ISSN 2713-2641

№3(128)
2026

АгроЭкоИнженерия

AgroEcoEngineering



АгроЭкоИнженерия №3(128) 2026

АгроЭкоИнженерия

Научный журнал

ISSN 2713-2641

№3(128) 2026

Учредитель:
ФГБНУ ФНАЦ ВИМ

Редакция: ИАЭП - филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (РОСКОМНАДЗОР)

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС 77 – 78977 от 14.08.2020 г.

Подписной индекс 013919
в Каталоге Агентства «Урал-Пресс»

Включен в Перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ для публикации трудов соискателей ученых степеней кандидата и доктора наук по следующим группам научных специальностей:
4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (для технических наук)
4.3.2. Электротехнологии, электрооборудование и энергоснабжение агропромышленного комплекса (для технических наук)

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)

Полные тексты статей размещены на сайтах электронных библиотек:
http://elibrary.ru; КиберЛенинка; ЭБС «Лань»

Над номером работали:

В.Ф. Вторый
В.А. Смелик
Ю.В. Плеханова
Л.В. Левченко

Адрес редакции: Санкт-Петербург, пос. Тярлево, Фильтровское шоссе, 3, 196634, Россия

Телефон: 7 (812) 466-83-08
E-mail: agroecoengineering@sznii.ru
https://agroecoengineering.sznii.ru/ru/

Выходит 4 раза в год
(Цена свободная)
Дата выхода в свет 26.10.2026

Формат 84´108 1/16.
Объем 15,54 усл. печ. л.
Тираж 300 экз.
Отпечатано в
ИАЭП - филиале ФГБНУ ФНАЦ ВИМ

©ИАЭП – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, 2026

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:
Брюханов Александр Юрьевич
доктор технических наук, доцент, академик РАН, ИАЭП – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:
Захаров Антон Михайлович
кандидат технических наук, ИАЭП – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:
Попов Владимир Дмитриевич,
доктор технических наук, академик РАН, ИАЭП – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ
Федоренко Вячеслав Филиппович
академик РАН, доктор технических наук, ФГБНУ ФНАЦ ВИМ
Павлюшин Владимир Алексеевич
академик РАН, доктор биологических наук, профессор, ФГБНУ ВИЗР
Тихомиров Дмитрий Анатольевич
член-корреспондент РАН, доктор технических наук, ФГБНУ ФНАЦ ВИМ
Вторый Валерий Федорович
доктор технических наук, старший научный сотрудник, ИАЭП – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ
Смелик Виктор Александрович
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО СПбГАУ
Ракутько Сергей Анатольевич
доктор технических наук, доцент, ИАЭП – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ
Керимов Мухтар Ахмиевич
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО СПбГАУ
Хакимов Рамиль Тагирович
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО СПбГАУ
Спиридонов Анатолий Михайлович
доктор сельскохозяйственных наук, доцент, ФГБОУ ВО СПбГАУ
Донских Нина Александровна
доктор сельскохозяйственных наук, профессор, ФГБОУ ВО СПбГАУ
Манохина Александра Анатольевна
доктор сельскохозяйственных наук, доцент, ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева
Даус Юлия Владимировна
доктор технических наук, ФГБОУ ВО КГАУ им. И.Т. Трубилина
Васильев Эдуард Вадимович
кандидат технических наук, ИАЭП – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ
Максимов Дмитрий Анатольевич
кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ИАЭП – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ
Перекопский Александр Николаевич
кандидат технических наук, доцент, ИАЭП – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ
Джабборов Нозим Исмоилович
доктор технических наук, профессор, ИАЭП – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ
Научный центр инновационных технологий и механизации сельского хозяйства Таджикской академии сельскохозяйственных наук, Республика Таджикистан
Ахмадов Бахромджон Раджабович
доктор технических наук, профессор, Таджикский аграрный университет им. Шериншох Шотемур, Душанбе, Республика Таджикистан
Ван Донгвей
PhD (Agricultural Mechanization Engineering), профессор, Колледж машиностроения и электротехники Сельскохозяйственного университета Циндао, (г. Циндао, КНР)
Комлач Дмитрий Иванович
кандидат технических наук, доцент; РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по механизации сельского хозяйства», Минск, Республика Беларусь
Костюченков Николай Васильевич
доктор технических наук, профессор, действительный член академии сельскохозяйственных наук Республики Казахстан, Казахский агротехнический исследовательский университет им. С. Сейфуллина, г. Астана, Республика Казахстан
Шанг Шукси
PhD (Agricultural Mechanization Engineering), профессор, Колледж машиностроения и электротехники Сельскохозяйственного университета Циндао, (г. Циндао, КНР)

AgroEcoEngineering

Scientific journal

ISSN 2713-2641

№3(128) 2026

Founder: Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Scientific Agroengineering Center VIM" (FSAC VIM)

Editorial Office: Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) - branch of FSAC VIM

The journal is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media (Roskomnadzor)

The mass media registration certificate ПИ No. ФС 77 – 78977 of 14 August 2020

Subscription index 013919 in the Ural-Press Agency Catalogue

The journal is on the List of Editions recommended by the Higher Attestation Commission (VAK) of the Russian Federation for publishing the writings of applicants for the academic degrees of Candidate and Doctor of Science in the following scientific specialties:
4.3.1. Technologies, machines and equipment for agro-industrial complex (for technical sciences)
4.3.2. Electrical technologies, electrical equipment and power supply of the agro-industrial complex (for technical sciences)

The journal is registered with the Russian Science Citation Index (RSCI)

Full texts of articles are available on the web-sites of electronic libraries: http://elibrary.ru; https://cyberleninka.ru/; https://e.lanbook.com/

Executive Editors:

V. F. Vtoryi
V. A. Smelik
Yu. V. Plekhanova
L.V. Levchenko

Editorial Office address: Saint Petersburg, Tiarlevo, Filtrovskoje Shosse, 3, 196634, Russia
Phone: +7 (812) 466-83-08
E-mail: agroecoengineering@sznii.ru
https://agroecoengineering.sznii.ru/ru/

Publication frequency: 4 issues per year (open price)

Date of imprint: 26.10.2026
Format: 84´108 1/16
Volume: 15,54 of printer's sheets
Circulation: 300 copies

Printed by IEEP – branch of FSAC VIM

©IEEP – branch of FSAC VIM, 2026

EDITOR-IN-CHIEF

Aleksandr Yu. Briukhanov
Full Member of the Russian Academy of Sciences, DSc (Engineering), Assistant Professor, IEEP – branch of FSAC VIM

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF

Anton M. Zakharov
Cand. Sc. (Engineering), IEEP – branch of FSAC VIM

EDITORIAL BOARD MEMBERS:

Vladimir D. Popov
Full Member of the Russian Academy of Sciences, DSc (Engineering), IEEP – branch of FSAC VIM

Viacheslav F. Fedorenko
Full Member of the Russian Academy of Sciences, DSc (Engineering), FSAC VIM

Vladimir A. Pavlyushin
Full Member of the Russian Academy of Sciences, DSc (Biology), Professor, All-Russian Institute of Plant Protection (VIZR)

Dmitry A. Tikhomirov
Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, DSc (Engineering), FSAC VIM

Valerii F. Vtoryi
DSc (Engineering), Senior Research Fellow, IEEP – branch of FSAC VIM

Victor A. Smelik
DSc (Engineering), Professor, Saint Petersburg State Agrarian University

Sergey A. Rakutko
DSc (Engineering), Assistant Professor, IEEP – branch of FSAC VIM

Mukhtar A. Kerimov
DSc (Engineering), Professor, Saint Petersburg State Agrarian University

Ramil T. Khakimov
DSc (Engineering), Assistant Professor, Saint Petersburg State Agrarian University

Anatoly M. Spiridonov
DSc (Agriculture), Assistant Professor, Saint Petersburg State Agrarian University

Nina A. Donskikh
DSc (Agriculture), Professor, Saint Petersburg State Agrarian University

Aleksandra A. Manokhina
DSc (Agriculture), Associate Professor, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy

Yulia V. Daus
DSc (Engineering), I.T. Trubilin Kuban State Agrarian University

Eduard V. Vasilev
Cand. Sc. (Engineering), IEEP – branch of FSAC VIM

Dmitry A. Maksimov
Cand. Sc. (Engineering), Senior Research Fellow, IEEP – branch of FSAC VIM

Aleksandr N. Perekopsky
Cand. Sc. (Engineering), Assistant Professor, IEEP – branch of FSAC VIM

Nozim I. Dzhabborov
DSc (Engineering), Professor, Scientific Center for Innovative Technologies and Agricultural Mechanization of the Tajik Academy of Agricultural Sciences, Republic of Tajikistan

Bahrom R. Ahmadov
DSc (Engineering), Professor, Tajik Agrarian University named after Sh. Shotemur, Dushanbe, Republic of Tajikistan

Wang Dongwei
PhD (Agricultural Mechanization Engineering), Professor, College of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao Agricultural University (QAU), Qingdao, People's Republic of China

Dmitry I. Komlach
Cand. Sc. (Engineering), Assistant Professor, Republican Unitary Enterprise "Scientific and Practical Centre of the National Academy of Sciences of Belarus for Agriculture Mechanization", Minsk, Republic of Belarus

Nikolay V. Kostiuchenkov
DSc (Engineering), Professor, Full member of the Academy of Agricultural Sciences of the Republic of Kazakhstan, S. Seifullin Kazakh Agro-Technical Research University, Astana City, Republic of Kazakhstan

Shang Shuqi
PhD (Agricultural Mechanization Engineering), Professor, College of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao Agricultural University (QAU), Qingdao, People's Republic of China

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ 1. ЭКОЛОГИЯ И ТЕХНОЛОГИИ В РАСТЕНИЕВОДСТВЕ

Федоренко В.Ф.
Переход к инновационным ресурсоэнергоэффективным агротехнологическим процессам, природоподобным многофункциональным движителям и органическому земледелию ….....5

Захаров А.М.
Обоснование и разработка технологии органического производства картофеля …….24

Новикова А. В., Новикова А. Н., Кузнецова Л. В.
Исследования семенных свойств сельскохозяйственных культур при хранении в полимерных рукавах ……..42

Вихрова Т.В., Датхужева Р.Х., Виздрик Г.М., Огнев О.Г., Строганов Ю.Н.
Оценка способа обеспечения устойчивости движения машинно-тракторного агрегата с асимметричной сельскохозяйственной машиной ……54

Якименко И.Ю., Хакимов Р.Т.
Определение ресурсного потенциала автотракторных моторных масел ……..71

РАЗДЕЛ 2. ЭКОЛОГИЯ И ТЕХНОЛОГИИ В ЖИВОТНОВОДСТВЕ

Брюханов А.Ю, Земцев В.И.
Анализ методов снижения выбросов аммиака, парниковых газов и запаха из навозохранилищ.....81

Егоров С.А.
Теоретическое обоснование параметров устройства очистки воздуха от аммиака при переработке отходов сельскохозяйственного производства ……...91

Давыдов А.А.
Современные подходы к технологическому проектированию коневодческих предприятий……106

Неменущая Л.А.
Ресурсосбережение как элемент системы управления качеством в производстве молочной продукции……118

Щеголихина Т.А.
Биоэкономические инновации в животноводстве: оптимизация кормовой базы и переработка побочных продуктов……..129

CONTENTS

SECTION 1. ECOLOGY AND TECHNOLOGY IN CROP GROWING

Fedorenko V.F.

Transition to innovative resource and energy efficient agrotechnological processes, nature- inspired multifunctional traction systems, and organic farming ……5

Zakharov A.M.

Substantiation and development of technology for organic potato production ……24

Novikova A. V., Novikova A. N., Kuznetsova L. V.

Investigation into crop seed viability when stored in polymer bags ……42

Vikhrova T.V., Datkhuzheva R.H., Vizdrick G.M., Ognev O.G., Stroganov Yu.N.

Evaluation of a movement stability control method for tractor-implement units with asymmetric agricultural machines……..……..54

Yakimenko I. Y., Khakimov R. T.

Defining a testing methodology to characterize the degradation process for used engine oils……71

SECTION 2. ECOLOGY AND TECHNOLOGY IN LIVESTOCK FARMING

Briukhanov A.Yu., Zemtsev V.I.

Review of methods for reducing ammonia, greenhouse gases, and odor emissions from manure storages. ……81

Egorov S.A. Theoretical foundations of device parameters for ammonia removal from air in agricultural waste processing. ……..….91

Davydov A.A.

Modern approaches to technological design of horse breeding enterprises……106

Nemenushchaya L.A.

Resource conservation as an element of the quality management system in dairy production.....118

Shchegolikhina T.A.

Bioeconomical innovations in animal husbandry: optimization of the feed base and processing of by-products……...129

РАЗДЕЛ 1. ЭКОЛОГИЯ И ТЕХНОЛОГИИ В РАСТЕНИЕВОДСТВЕ

Научная статья
УДК 631.31 DOI 10.24412/2713-2641-2026-2127-5-24

ПЕРЕХОД К ИННОВАЦИОННЫМ РЕСУРСОЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫМ АГРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССАМ, ПРИРОДОПОДОБНЫМ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫМ ДВИЖИТЕЛЯМ И ОРГАНИЧЕСКОМУ ЗЕМЛЕДЕЛИЮ

Вячеслав Филиппович Федоренко

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Россия
professorfedorenko@yandex.ru; vim@vim.ru; https://orcid.org/0000-0001-6395-4463

Аннотация. Современные тенденции трансформации технологических процессов и технических систем в растениеводстве связаны с отказом от экстенсивных, энергозатратных агротехнологий, прежде всего от отвальной вспашки с оборотом пласта, ухода от вертикального перемешивания почвенных горизонтов и разрушения корнеобитаемых слоев с минимальным воздействием на поверхностные, наиболее продуктивные слои. Разрабатываются технологические процессы и технические системы, базирующиеся на отличных от земледельческой механики физических принципах, которые опираются на современные представления о физиологии процессов в растениеводстве, симбиоза микроорганизмов почвы с растениями. Цель исследования – обоснование и реализация инновационных физических процессов перехода к органическому земледелию трансформацией и интегрированием агротехнологических процессов с природоподобными ресурсоэнергоэффективными движительными системами посредством одновременного внутрипочвенного шагания с помощью пневмогидробуров-почвозацепов, обработки импульсами сжатого воздуха, экспресс-мониторинга состава почв, дозированной подачи растворов агробиопрепаратов и разработка таких систем. Исследование базируется на ретроспективном анализе научных источников, патентном поиске, оценке недостатков известных технических систем. Основные методы: анализ, обобщение экспериментальных данных, теоретические лабораторные исследования, полевые испытания. Разработанная система посредством возвратно-вертикального погружения в корнеобитаемые почвенные слои пневмогидробуров-почвозацепов обеспечивает устойчивое перемещение сельскохозяйственного агрегата над поверхностью поля, и одновременно осуществляет импульсами сжатого воздуха внутрипочвенное рыхление, аэрацию, экспресс-мониторинг агрохимических параметров почвы и адресное внесение растворов агробиопрепаратов в режиме реального времени. Доказано, что предлагаемый подход исключает уплотнение почвы, сохраняет гумусовый слой и биоценоз. Предлагаемые агротехнологические решения, защищенные патентами, создают возможности и условия в режиме онлайн сканировать почвенный горизонт, осуществлять экспресс анализ характеристик почвы, на его основе подавать в почву необходимую дозу соответствующих препаратов. В результате обеспечиваются оптимальные агротехнические условия для максимальной реализации созданного генетического потенциала продуктивности культивируемых сортов, сокращаются ресурсоэнергозатраты и формируются реальные условия перехода к органическому земледелию.

Ключевые слова: природоподобные технологии, биоценоз, гумус, природный ресурсоэнергооборот, обработка почвы импульсами сжатого воздуха, движительные системы.

Для цитирования: Федоренко В.Ф. Переход к инновационным ресурсоэнергоэффективным агротехнологическим процессам, природоподобным многофункциональным движителям и органическому земледелию // АгроЭкоИнженерия. 2026. № 3(128). С. 5-24 https://doi.org/10.24412/2713-2641-2026-2127-5-24

Research Article
Universal Decimal Code 631.3

TRANSITION TO INNOVATIVE RESOURCE AND ENERGY EFFICIENT AGROTECHNOLOGICAL PROCESSES, NATURE- INSPIRED MULTIFUNCTIONAL TRACTION SYSTEMS, AND ORGANIC FARMING

Vyacheslav F. Fedorenko

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia
professorfedorenko@yandex.ru; vim@vim.ru; https://orcid.org/0000-0001-6395-4463

Abstract. Modern trends in the transformation of technological processes and technical systems in crop production escape extensive, energy- consuming agricultural technologies, primarily moldboard plowing with soil overturning. The main goal is to avoid vertical mixing of soil horizons and destruction of root- zone area, providing the least impact on the surface, most productive layers. Novel technologies and systems operate on physical principles that differ from those of classical agricultural mechanics. They rely on modern concepts of the physiology of crop growing processes, including the symbiosis of soil microorganisms with plants. The study aimed to justify and implement innovative physical processes for transitioning to organic farming by transforming and integrating agricultural technological processes with nature- inspired, resource and energy efficient traction systems. This is achieved through simultaneous subsurface walking using pneumatic-hydraulic soil-gripping drills, treating the soil with compressed air pulses, real-time monitoring of soil composition, and metered feeding of agricultural biological solutions. The study initiated with a comprehensive literature review, a patent search, and an evaluation of the limitations inherent in existing technical systems. The core research methodology integrated the synthesis of experimental data, theoretical laboratory modeling, and empirical field trials. The developed system relies on the reciprocating vertical penetration of pneumatic-hydraulic soil-gripping drills into the root-zone layers, ensuring the stable travelling of the agricultural unit across the field terrain. Simultaneously, the system performs subsurface loosening via compressed air pulses, soil aeration, real-time monitoring of soil agrochemical parameters, and the targeted application of liquid biological preparations. The investigation proves that the proposed method prevents soil compaction and preserves the humus layer alongside the existing soil biocenosis. The underlying technical solutions are patent-protected and provide the necessary conditions for real-time scanning of soil horizons and analysis of soil characteristics, enabling immediate, site-specific application of required biological formulations. Consequently, this technology establishes optimal agrotechnical conditions to maximize the inherent genetic yield potential of cultivated crop

varieties, drastically lower resource and energy consumption, and provide a viable framework for the transition to organic farming.

Keywords: nature-inspired technologies, biocenosis, humus, natural resource and energy cycle, soil cultivation with compressed air pulses, traction systems

For citation: Fedorenko V.F. Transition to innovative resource and energy efficient agrotechnological processes, nature- inspired multifunctional traction systems, and organic farming AgroEcoEngineering. 2026;3(128):5-24 (In Russ.) https://doi.org/10.24412/2713-2641-2026-2127-5-24

Введение. Эволюция агротехнологических процессов обработки почвы и движительных систем в земледелии происходила в соответствии с фундаментальным принципом развития биосферы земли: max производства энтропии за счет неконтролируемого использования доступных природных энергоресурсов – главным образом поступающей от солнца фотосинтетической активной радиации и запасенной энергии в виде газа, нефти, угля, а также гумуса почвы, накопленных в предыдущие периоды формирования биосферы [1, 2].

С середины прошлого века в соответствии со вторым фундаментальным принципом развития биосферы max производства энтропии, начался закономерный переход, в том числе в земледелии, основанный на рационализации использования доступных природных био-энергоресурсов, который основывается на отказе от отвальной вспашки с оборотом, резанием, крошением, разрушением корнеобитаемых горизонтов почв, вертикального их перемешивания, мульчирования почвенного покрова, с целью сохранения биоценозов и влаги, предотвращения деградации и эрозии почвы (рис. 1) [1-15].

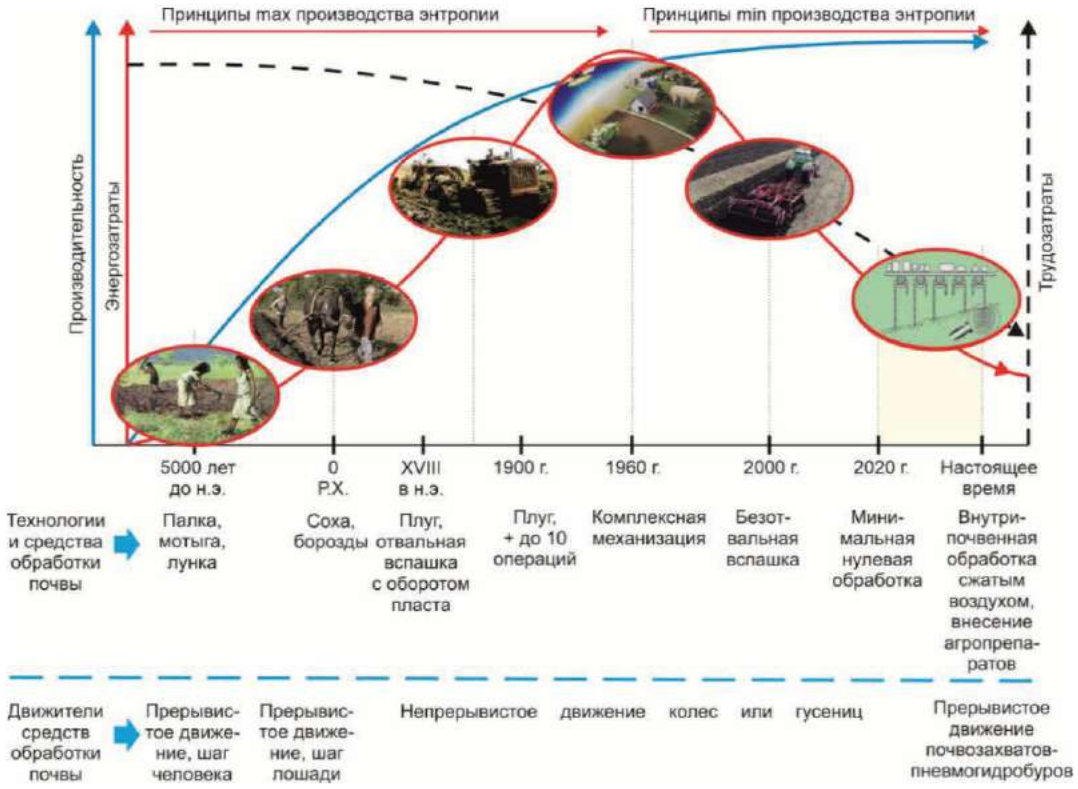


Рис. 1. Эволюция физико-агротехнологических процессов обработки почвы и движительных систем в земледелии

Fig. 1. Evolution of physical and agrotechnological processes of soil cultivation and traction systems in agriculture

Переход к развитию природоохранных, природоподобных агротехнологий и технических систем, которые ориентированы на энергоресурсоэкономичные и экологически рациональные, физические принципы и способы обработки, обусловлен еще и тем, что основные агротехнические процессы в настоящее время выполняются тяжелыми энергетическими системами (тракторы, комбайны, транспортные средства), перемещающимися по полю колесными или гусеничными движителями. Такие движители создают тяговое усилие за счёт сцепления с поверхностью, но при этом производят неконтролируемый сдвиг, разрушение верхних слоев почвы, повреждают корневую систему растений, нарушают водный и воздушный баланс. Все это активизирует эрозию, дефляцию и деградацию угодий. Результаты обследования Минсельхоза России (рис.2) подтверждают, что отвальная вспашка создает условия для всех видов эрозийных процессов [1-3].

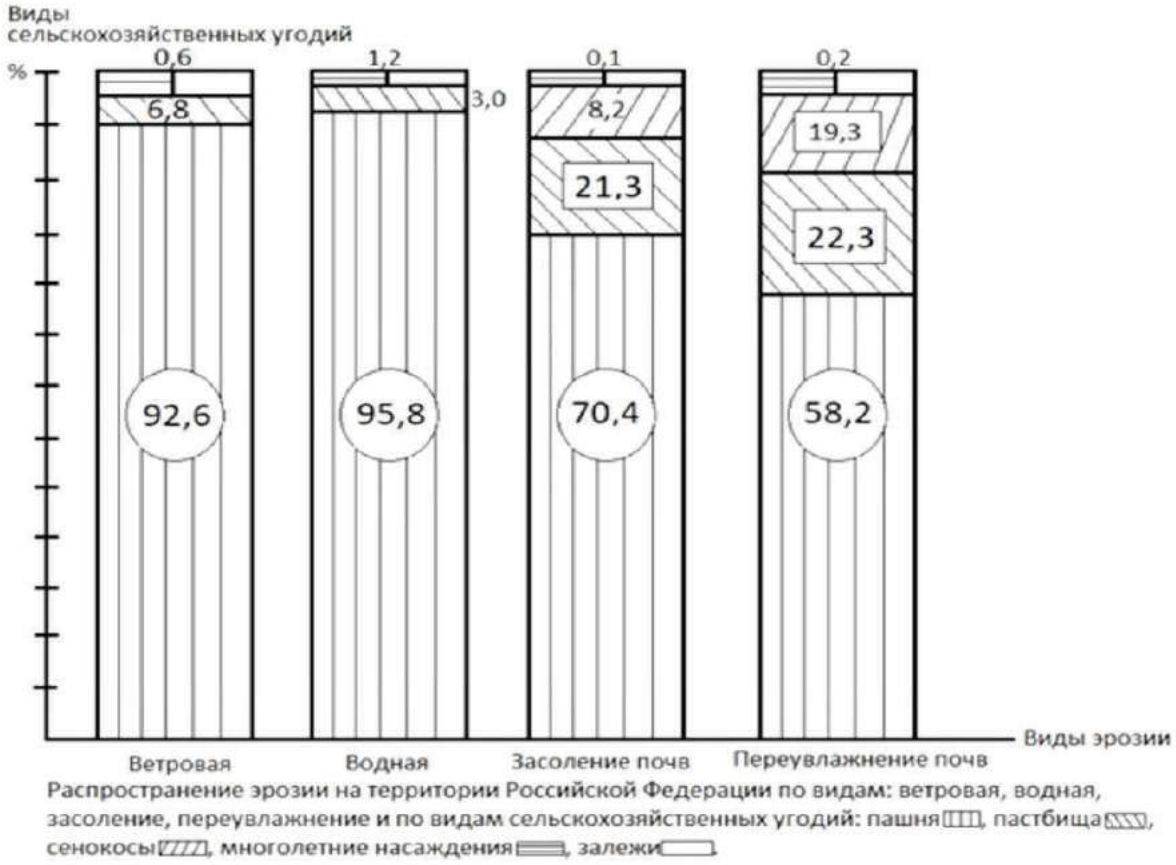


Рис. 2. Распространение эрозии на территории Российской Федерации по видам: ветровая, водная, засоление, переувлажнение, и по видам сельскохозяйственных угодий: пашня, пастбища, сенокосы, многолетние насаждения, залежи.

Fig. 2. Distribution of erosion across the territory of the Russian Federation by type: wind erosion, water erosion, salinization, waterlogging, and by type of agricultural land: arable land, pastures, hayfields, perennial plantings, fallow lands.

В настоящее время особенно актуальны и востребованы технические системы внутрипочвенной обработки сельскохозяйственных угодий, которые интегрированы в природный ресурсооборот и базируются на современных представлениях о физиологии растений, их симбиоза с почвенными биомикроорганизмами, которые формируют и обеспечивают ресурсоэнергоэффективные продукционные процессы в земледелии [17-26].

Обоснованы оптимальные условия для растений в экстремальных ситуациях: недостаток или избыток влаги, воздуха, питательных элементов в почве, необходимость

борьбы с сорняками, вредителями. Особенно остро строит проблема с проявлениями водной и ветровой эрозии, что обусловлено рельефом склонов большей части земельных угодий страны. Например, в Центрально-Черноземном регионе – важном аграрном регионе с интенсивно развивающимся растениеводством, обладающим большим потенциалом сельскохозяйственного производства.

Площади, наименее подверженные ветровой эрозии, составляют 92,6%; водной – 95,8%; засолению – 70,4% и переувлажнению – 58,2%. Пастбища, сенокосы, многолетние насаждения практически не подвержены ветровой и водной эрозии (исключение – засоление и переувлажнение), что подтверждает тот факт, что корни растений формируют органический каркас почвенной структуры, скрепляют частицы почвы, обеспечивают биоту органическим питанием и гумусовый компонент. Наличие растительности значительно снижает или полностью предотвращает развитие водной и ветровой эрозии.

Еще в 1899 году русский ученый-агроном Иван Евгеньевич Овсинский, один из основоположников почвозащитной системы земледелия, доказал вредность плуга. Он указывал, что при глубокой вспашке затрачиваются огромные средства на увеличение тяглового усилия и удобрения, теряются миллиарды рублей из-за неурожаев при засухе. Он сравнивал разрушительный эффект от плуга с действием артиллерийских снарядов: «Знаменитый Крупп своими снарядами военного разрушения не принес столько вреда человечеству, сколько принесла одна фабрика плугов для глубокой вспашки»[1]. На Западе развитие ресурсосберегающего земледелия начинается в 1930-е годы. В 1943 г. вышла книга Э. Фолкнера «Безумие пахаря»[2], где плужная обработка была подвергнута критике, как вреднейший приём, приведший земледелие США и других стран к упадку. В СССР аналогичные идеи развивали Т.С. Мальцев (Зауралье)[3], А.И. Бараев (Казахстан и Сибирь)[4]. С этих исследований начался переход к адаптивным, почвозащитным, природоохранным, минимальным, нулевым и «зеленым» технологиям обработки почвы, характеризующимся частичным или полным отказом от отвальной вспашки, отсутствием вертикального перемешивания пахотного слоя, минимальным нарушением почвенного покрова и обязательным мульчированием [16].

Оценка эффективности конструкций движителей, применяемых в сельскохозяйственных машинах, по результатам испытаний на машиноиспытательных станциях, а также выводам собственных исследований, свидетельствует о возможности и перспективах применения пневмогидробуров в качестве почвозацепов движителей сельскохозяйственных агрегатов [16-22]. Во время возвратно-вертикального погружения, при внутрипочвенной обработки импульсами сжатого воздуха разработанным способом (Патент № 2830861 РФ), пневмогидробуры-почвозацепы несколько десятков секунд находятся в почве статично. За это время происходит онлайн сканирование агрофизических и агрохимических параметров корнеобитаемых почвенных горизонтов, регулировка и дозированная подача агропрепаратов непосредственно в корневую систему растений.

[1] Овсинский И. Е. Новая система земледелия. Киев, Харьков: Ф.А. Иогансон. 1899. 175 с. Гл. 3. Стр. 70 https://viewer.rusneb.ru/ru/000199_000009_003689167?page=76&rotate=0&theme=white

[2] Фолкнер Э.Х. Безумие пахаря. М.: Сельхозгиз. 1959. 302 с. (Faulkner E. H. Plowman's Folly. University of Oklahoma Press. 1943. 159 p.)

[3] Мальцев Т. С. Вопросы земледелия (избранное). 3-е изд. М.: Агропромиздат. 1985. 432 с.

[4] Бараев А.И. Почвозащитное земледелие: Избранные труды (к 90-летию А.И. Бараева). Новосибирск. 1998. 168 с.

Одновременно пневмогидробур выполняет функцию почвозацепа. В результате происходит совмещение функций движителя и агроагрегата в одной технической системе. Это позволяет радикально изменить конфигурацию агротехнологии, реализовать принцип природоподобия, на порядок сократить ресурсоэнергозатраты в земледелии [18-26].

Переход к инновационной разработке эффективных технологических принципов и природоподобных технических систем, которая нивелирует растущие вызовы экологической, энергетической безопасности и обеспечивает реализацию постулата Б. Коммонера «природа знает лучше» («nature knows best»)[5], чрезвычайно актуален и жизненно необходим [16].

Стоит задача адаптировать физические принципы, разработать инновационные решения трансформации и интеграции в природоподобный ресурсоэнергооборот технологических процессов и технических систем: внутрипочвенной обработки, рыхления, аэрации импульсами сжатого воздуха и последующего орошения подачи органических и агрохимических препаратов в корнеобитаемые слои почвы, а также разработка и реализация базирующегося на природоподобных принципах, комплексного ухода и совмещения движительных функций в едином многофункциональном движительно-агротехнологическом агрегате.

Цель исследования. Обоснование и реализация инновационных физических процессов перехода к органическому земледелию трансформацией и интегрированием агротехнологических процессов с природоподобными ресурсоэнергоэффективными движительными системами посредством одновременного внутрипочвенного шагания с помощью пневмогидробуров-почвозацепов, обработки импульсами сжатого воздуха, экспресс-мониторинга состава почв, дозированной подачи растворов агробиопрепаратов и разработка движительно-агротехнологической ресурсоэнергоэффективной природоподобной системы (ДАРПС).

Материалы и методы. Ретроспективный анализ научных источников, передового отечественного и мирового опыта патентного поиска, научной информации лабораторно-полевых исследований позволили выявить недостатки известных приемов обработки почвы и обосновать возможность регулировки в режиме реального времени глубины погружения в почву пневмогиробуров-почвозацепов, установить частоты и давление импульсов сжатого воздуха, а также изменения давления подачи раствора в зависимости от величины пенетрации почвы и основных препаратов. Без учета состояния и типа почвы не обеспечивается качество и энергоэффективность обработки, не исключается возможность избыточной подачи и неэффективного распределения воды и растворов удобрений непосредственно к корневой системе растений [10-16].

Результаты. Ситуация сохранения почвенного биоразнообразия, как свидетельствуют анализ научной информации и производственного зарубежного и отечественного опыта, обостряется и усугубляется вследствие роста количества и интенсивности экологических, энергетических, климатических, антропогенных факторов негативного воздействия на биосферу земли. Особенно на земли сельскохозяйственного назначения, являющиеся основным природным ресурсом, ценность которых как главного средства сельскохозяйственного производства определяется плодородием. Поэтому переход к органическому земледелию базируется на обеспечение оптимальных физико-биологических

[5] Коммонер Б. Замыкающийся круг: Природа, человек, технология. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 279 с. (Commoner B. The Closing Circle: Nature, Men, and Technology. New York: Alfred A. Knopf. 1971)

условий сохранения и развития агробиоценозов, сформировавшихся при воздействии сельскохозяйственных культур без оборота и разрушения корнеобитаемых почвенных слоев. Кроме того, основные технологические процессы в земледелии в настоящее время выполняются массивными, тяжелыми самоходными комбайнами и сельскохозяйственными машинами, транспортными и другими средствами, которые перемещаются по поверхности поля движителями колесного или гусеничного вида различной конструктивной модификации. Также агрегаты с подобными движителями осуществляют перемещение технических систем посредством создания тягового усилия за счет сцепления колес, гусениц с поверхностью почвы поля, сада, бахчи, виноградника, луга и пр. При этом они производят неконтролируемый сдвиг, разрушение поверхностных слоев почвы, нарушение водно-воздушного баланса. Все это активизирует развитие процессов почвенной деградации с нерационально высокими ресурсоэнергозатратами. В конструкции колесных и гусеничных движителей принципиально отсутствует техническое средство оценки и учета в режиме реального времени физических характеристик почвы: твердости, влажности, пластичности и др., а также возможностей адекватного адаптирования и оптимизации к ним параметров движителя при работе в реальных условиях. Более того, ни один из известных движителей не способен одновременно выполнять агротехнологические функции или операции, такие как обработка почвы, полив, внесение удобрений, средств защиты насаждений и пр.

Представлен анализ итогов проведённых Минсельхозом России исследований распространения основных негативных процессов по общей обследованной площади и по видам сельскохозяйственных угодий (рис. 2) [1, 2]. Оценка производственного опыта с учётом результатов научных исследований свидетельствует, что основными наиболее распространёнными агротехническими приемами и техническими системами регулирования режима интенсивности биологических процессов и фитосанитарного состояния остаются технологии, машины и орудия, создающие избыточное механическое воздействие на почву, прежде всего на верхние корнеобитаемые слои, путём резания, крошения, оборачивания, выравнивания, уплотнения и прочих операций.

Следствием этого, и прежде всего отвальной вспашки плугом с оборотом пласта, являются негативные факторы нарушения динамического равновесия системы «почва-растения-окружающая среда», эрозийные процессы (таблица) [1]. В составе сельскохозяйственных угодий в среднем по Центрально-Черноземной зоне площадь склоновых угодий составляет 52%. Современная, качественная и ресурсоэнергоэффективная комплексная обработка, с учётом склона ландшафтов размещения возделываемых культур, позволяет повысить урожайность и качество продукции за счёт создания оптимальных условий симбиоза почвенных агроценозов и корневых некрозов растений и реализовать таким образом максимальную генетическую продуктивность созданных сортов сельскохозяйственных культур.

Таблица. Распределение сельскохозяйственных угодий: по крутизне склонов и эродированности (данные ЦЧО НИИ Гипрозем)

Table. Distribution of agricultural land: by slope steepness and erosion (data from the Central Chernozem Regional Department of Land Management)

Наименование областей	Уклоны, площадь, %			Обрабатываемая площадь земель, тыс. га	Эродированные почвы, %	Приращение за год, %
	До 1	1-3	3			
Белгородская	28,1	43,0	28,9	1682,4	40,6	0,189
Воронежская	51,1	29,7	19,2	3194,7	17,6	0,082
Курская	27,4	50,3	29,3	1993,7	22,6	0,105
Липецкая	48,5	40,3	11,2	1670,1	12,3	0,057
Тамбовская	70,8	19,9	9,3	2290,6	7,3	0,034
Итого по ЦЧР	47,4	34,6	18,0	10831,5	19,1	0,089

В настоящее время в сельском хозяйстве трактора, комбайны, сельскохозяйственные машины, транспортные и другие средства перемещаются по поверхности полей движителями колесного или гусеничного вида с различными конструктивными модификациями [13,19].

Это обусловлено отсутствием в конструкции современных движителей технических решений, позволяющих оценивать в режиме реального времени физико-механические параметры почвы и адаптировать к ним параметры движителя для оптимизации его работы. В связи с этим представляется необходимым и целесообразным применение движителей и совмещения в одном устройстве функций движителя и технологического рабочего органа интегрированных в природный ресурсооборот, которые базируются на природоподобных принципах, многофункциональном и комплексном подходе [11, 24].

ГОСТ 16265-89[6] определяет более 60 видов агротехнологических воздействий на почву, большинство из которых оказывает значительное негативное воздействие на плодородие почв, формируя условия развития процессов деградации, эрозии и дефляции сельскохозяйственных земель. Эти воздействия затрачивают 10-15 МДж энергии на гектар поскольку базируются на физических принципах резания, крошения и оборота разнородных слоев почвы, каждый из которых населен огромным количеством различных микроорганизмов, грибов, бактерий и пр. Агроценозы в своей жизнедеятельности обеспечивают формирование и накопление в почве гумуса. При обороте пласта аэробные агроценозы, адаптированные к жизни в верхних горизонтах почвы, оказываются в глубине и в большинстве погибают, а анаэробные агроценозы из нижних горизонтов, попадая в верхние горизонты также погибают [14,17].

Интенсивное воздействие на почвенные горизонты нарушает равновесие экологической системы «почва-растение-атмосфера», активизирует процессы разрушения

[6] ГОСТ 16265-89 «Земледелие. Термины и определения». Электронный ресурс]. URL: https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294836/4294836140.pdf (дата обращения 10.04.2026)

структуры гумуса и при формировании урожая до 50% увеличиваются непроизводительные потери органического углерода [23-26].

Поэтому в земледелии особенно остро стоит проблема поиска и разработки новых, эффективных агротехнологических принципов, обеспечивающих трансформацию и развитие природоохранных, природоподобных, «зеленых» технологий земледелия, переход от стратегии, базирующейся на принципе максимума производства энтропии к стратегии ее минимального производства с рациональным использованием доступных природных ресурсов [19, 22].

Анализ конструкции известных движителей, результатов испытаний сельскохозяйственной техники, собственные исследования свидетельствуют о возможности, целесообразности и перспективах применения в качестве почвозацепов пневмогидробуров в движителях сельскохозяйственных агротехнологических агрегатов [3, 14, 15], согласно разработанному автором изобретению «Способ внутрипочвенной обработки, рыхления, аэрации, орошения, подачи органических и агрохимических препаратов в корнеобитаемые слои почвы» (Патент № 2853824, 2025 г.). Во время возвратно-вертикального погружения в корнеобитаемые слои почвы пневмобуры одновременно создают горизонтальные усилия и перемещают агротехнологический агрегат над поверхностью поля. За время нахождения в почве пневмогидробура-почвазацепа происходит сканирование агрофизических и агрохимических параметров почвы, процессов обработки возделываемых культур. В результате создаются оптимальные условия совмещения функций движителя и агротехнологического агрегата в одной технологической системе, что позволяет радикально изменить конфигурацию агротехнологии, значительно повысить качество обработки посевов и на порядок сократить ресурсоэнергозатраты в земледелии и сельскохозяйственном производстве.

Для описания физических параметров и основных агротехнологических характеристик способа, расчета конструкции движителя и эксплуатационных параметров его работы сформулирована математическая модель оптимизации внутрипочвенной обработки с учетом особенностей почвы, агротехнических.

Математическая модель повышения эффективности многофункционального сельскохозяйственного движителя строится как многокритериальная оптимизационная задача с целевой функцией эффективности $Ф$ и системой ограничений, учитывающих энергетические затраты, агротехнологические требования, механические ограничения, надёжность системы [20-26].

Целевая функция – максимизация комплексного показателя эффективности процесса.

$$Ф=\sum_{i=1}^{4} \text{ wi Ki} \rightarrow \max, \qquad (1)$$

где: $К_1$ – энергетическая эффективность (КПД): $К_2$ – производительность (га/ч): $К_3$ – качество обработки почвы: $К_4$ – надёжность системы; wi – весовые коэффициенты ($\Sigma wi = 1$)

Ключевые показатели рассчитываются системой уравнений:

Энергетическая эффективность ($К_1$)

$$К_1=\eta_{ен}\frac{Рполез}{Рсум} \qquad (2)$$

где: $Р_{полез} = F_{тяг}V$ – полезная мощность (тяговое усилие х скорость). Вт; $Р_{сум} = Р_{эл}+Р_{компр}+ Р_{насос} + Р_{управ}$ – суммарное энергопотребление, Вт.

Тяговое усилие для $N_{кат}$ катков:

$$F_{тяг} = \sum_{i=1}^{Nкат} (F_{пен,i} + F_{тр,i} + F_{ин,i}) \qquad (3)$$

где: $F_{пен,i}$ – сила пенетрации (измеряется тензодатчиком), Н., $F_{тр,i}$ – сила трения катка о почву. Н; $F_{ин,i}$ – инерционная составляющая, Н.

Производительность ($К_2$):

$$К_2 = П = vBK_{ар} \quad (4)$$

V – рабочая скорость, м/с;

$B= N_{оси} B_{оси} + N_{доп} B_{доп}$ – ширина захвата, м;

$К_{вр} = \frac{Траб}{Тобщ}$ – коэффициент использования рабочего времени.

Качество обработки почвы ($К_3$):

$$К_3=Q=\frac{1}{5}(Q_{плот}+Q_{влаж}+Q_{темп}+Q_{пит}+Q_{ровн}), \quad (5)$$

где показатели нормированы на [0; 1]: $Q_{плот}$ – равномерность плотности (по пенетрометру); $Q_{влаж}$ – соответствие влажности оптимуму; $Q_{темп}$ – соответствие температуры оптимуму; $Q_{пит}$ – баланс NPK (датчики ионов); $Q_{ровн}$ – выровненность поверхности.

Надёжность ($К_4$):

$$К_4 = R = \exp(-\lambda T_{раб}) К_{рез} \quad (6)$$

где: λ – интенсивность отказов, 1/ч; $T_{раб}$ – наработка, ч; $К_{рез} = \frac{Nрез}{Nобщ}$ – коэффициент резервирования.

Динамическая модель движения описывается системой уравнений.

Уравнение движения катка:

$$m\frac{dv}{dt} = F_{тяг,i} – F_{сопр,i} – F_{ин,i} \quad (7)$$

где: m – масса катка, кг; $F_{сопр,i}$ – сопротивление почвы, Н; $F_{ин,i} = ma$ – инерционная сила, Н.

Скорость цепи:

$$V_{цеп} = \pi d_{зв} V, \quad (8)$$

где: $d_{зв}$ – диаметр звёздочки, м; V – частота вращения, об/с.

Модель подачи агропрепаратов оценивает:

Расход препарата

$$q_{преп} = \frac{qклапNклап}{VB} \quad (9)$$

где: $q_{клап}$ – расход через клапан, л/с; $N_{клап}$ – число работающих клапанов.

Сила пенетрации:

$$F_{пен,i} = k_{пен} x_i + C_{демп} x_{сп}. \quad (10)$$

где: $k_{пен}$ – коэффициент жёсткости почвы; x_i – глубина погружения наконечника, м; $C_{демп}$ – коэффициент демпфирования: $x_{сп}$ – скорость погружения, м/с.

Давление в пневмогидробуре:

$$P_{бур} = P_{рес} - \Delta P_{шл} – P_{сопр} \quad (11)$$

где: $P_{рес}$ – давление в ресивере, Па; $\Delta P_{шл}$ – потери в шлангах, Па; $P_{сопр}$ – сопротивление почвы, Па.

Система уравнений, описывающих ограничения:

Энергетическое:

$$P_{сум} \leq P_{ном}, \quad (12)$$

где $P_{ном}$ – номинальная мощность источника, Вт.

Агротехнологическое:

$$F_{пен,i} \leq F_{доп} \quad (13)$$

где $F_{доп}$ – допустимая сила пенетрации, Н.

Дозиметрическое:

$$q_{преп} \in [q_{min}; q_{max}] \quad (14)$$

где q_{min}, q_{max} – нормы внесения, л/га.

Скоростное:

$$V \in [V_{min}; V_{max}], \quad (15)$$

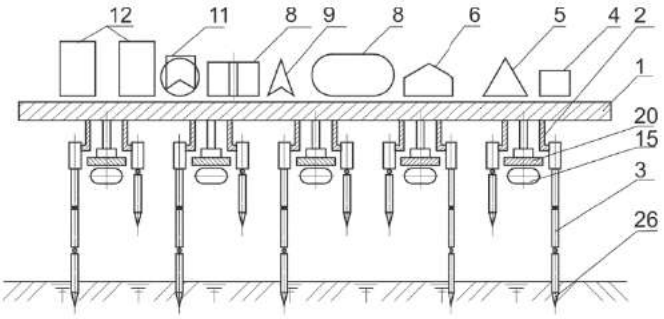
где V_{min}, V_{max} – минимальная и максимальная скорости, м/с.

Механическое:

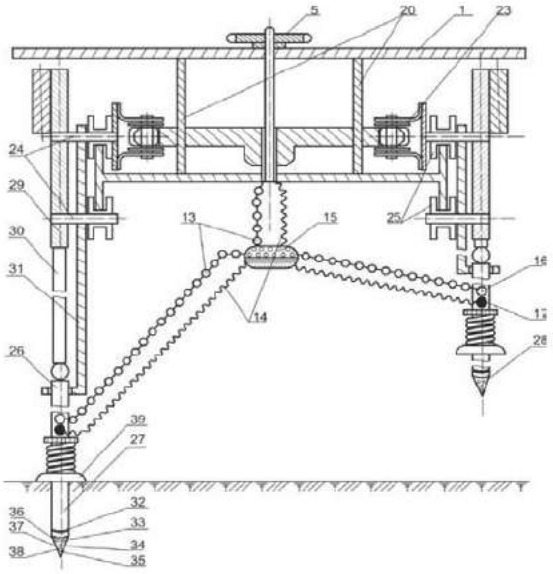
$$P_{бур} \leq P_{доп, бур} \quad (16)$$

где $P_{доп, бур}$ – максимально допустимое давление в буре, Па.

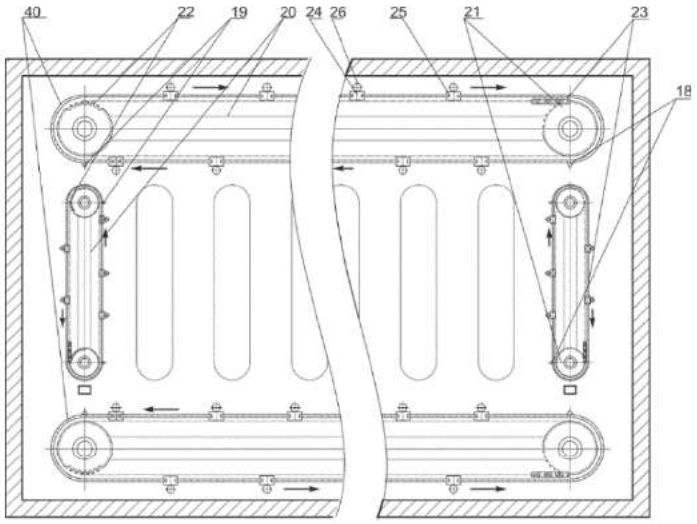
Алгоритм оптимизации предусматривает: сбор данных с датчиков (пенетрация, влажность, температура, NPK) о текущем состоянии системы (токи, давления, скорости); расчёт показателей: К1, К2, К3, К4: интегральный Ф; проверку ограничений: энергопотребление, агронормативы, скоростные и механические лимиты; оптимизацию параметров (методами нелинейного программирования): скорость V; давление $P_{бур}$ (расход препарата, частота вращения; корректировку управления путем регулировки электропневмоклапанов.



а)



б)



в)

Рис. 3. Движитель многофункциональный сельскохозяйственный (патент на изобретение № 2870431)

Фронтальный разрез по ходу движения; а) – схема общего вида; б) – схема основных направляющих и почвозацепов при выполнении рабочего процесса; в) – схема размещения дополнительных направляющих: 1 – рама; 2 – основная направляющая; 3 – почвозацеп; 4 – источник электроэнергии; 5 – электропривод; 6 – блок управления; 7 – пенетрометр; 8 – даталоггер; 9 – компрессор; 10 – ресивер сжатого воздуха; 11 – насос; 12 – баки с растворами агропрепаратов; 13 – шланги сжатого воздуха; 14 – шланги агропрепаратов; 15 – распределитель-стабилизатор; 16 – электропневмоклапан сжатого воздуха; 17 – клапан агропрепаратов; 18 – включатель; 19 – выключатель; 20 – рамный элемент; 21 – ведущая и 22 – ведомая тяговые звездочки; 23 – тяговая цепь; 24 – оси; 25 – опорный каток; 26 – пневмогидробур; 27 – подпружиненный ствол; 28 – перфорированный наконечник; 29 – линейный актуатор; 30 – шток; 31 – консольная направляющая; 32 – тензометрический датчик силы пенетрации почвы; 33 – датчик влажности; 34 – датчик температуры; 35 – датчик концентрации ионов; 36 – датчик уровня азота; 37 – датчик уровня фосфора; 38 – датчик уровня калия; 39 – защитный зонд; 40 – дополнительные направляющие.

Fig. 3. Multifunctional agricultural traction device (patent on invention No 2870431)

Frontal section along the travel direction; a) – general view diagram; b) – diagram of the main guides and soil-gripping drills during the work process; c) – diagram of the arrangement of additional guides: 1 – frame; 2 – main guide; 3 – soil-gripping drill; 4 – power source; 5 – electric drive; 6 – control unit; 7 – penetrometer; 8 – data logger; 9 – compressor; 10 – compressed air receiver; 11 – pump; 12 – tanks with solutions of agricultural agents; 13 – compressed air hoses; 14 – hoses for agricultural agents; 15 – distributor–stabilizer; 16 – compressed air electro–pneumatic valve; 17 – valve for agricultural agents; 18 – switch; 19 – circuit breaker; 20 – frame element; 21 – leading and 22 – driven traction sprockets; 23 – traction chain; 24 – axles; 25 – support roller; 26 – pneumatic hydraulic drill; 27 – spring–loaded barrel; 28 – perforated tip; 29 – linear actuator; 30 – rod; 31 – console guide; 32 – soil penetration force strain gauge; 33 – moisture sensor; 34 – temperature sensor; 35 – ion concentration sensor; 36 – nitrogen level sensor; 37 – phosphorus level sensor; 38 – potassium level sensor; 39 – protective probe; 40 – additional guides.

Движитель многофункциональный сельскохозяйственный работает соответствующим образом (рис.3). Он устанавливается в начало обрабатываемого поля так, чтобы рабочие ветви основных направляющих *2* располагались по центру параллельно междурядий насаждений.

Включают подачу электроэнергии и ведущие тяговые звездочки *21* и перемещают приводные тяговые цепи *23* с закрепленными на них и свободно установленными на рабочих направляющих *2* опорные катки *25* с консольными направляющими *31* и линейными актуаторами *29*, которые, воздействуя с включателем *18,* соединяются с источником электроэнергии *4* и посредством штока *30* шарнирно связанного со стволом *27* по консольной направляющей *31* погружают вертикально в почву пневмогидробуры *26*, находящиеся на рабочих ветвях направляющих *2*, которые взаимодействуют с почвой и посредством приводных тяговых цепей *23* создают тяговые усилия, перемещая несущую раму *1*.

Одновременно каждый перфорированный наконечник *28*, преодолевая пенетрацию корнеобитаемых горизонтов почвы, деформирует упругий элемент тензометрического датчика силы *32*, создает электрический сигнал, величина которого прямо пропорциональна величине силы пенетрации почвы. Сигнал поступает в пенетрометр 7, который в зависимости от величины этого электрического сигнала, устанавливает частоту и величину давления импульсов сжатого воздуха.

Достигнув заданной глубины, каждый ствол *27*, воздействуя на включатель 18, который открывает подачу по шлангам *13*, стволам *27* через перфорацию наконечников *28* импульсы сжатого воздуха в корнеобитаемые горизонты почвы, осуществляют ее рыхление, аэрацию, создают полости и микропустоты. Датчики влажности *33*, температуры *34,* концентрации ионов *35*, уровня азота *36*, фосфора *37*, калия *38* фиксируют величину и содержание этих компонентов в данной точке корнеобитаемого горизонта почвы и передают соответствующие сигналы в даталоггер *8*, который устанавливает необходимое количество раствора агропрепаратов и осуществляет его подачу посредством насоса *11* из баков *12* по стволам *27*, наконечникам *28* в образованные в почве полости и пустоты непосредственно в корневую систему растений. При этом подпружиненный эластичный защитный зонд *39* плотно прижимается к поверхности почвы вокруг сопряжения поверхности ствола *27* и поверхности скважины, образованной в корнеобитаемом слое почвы, и предотвращает потери сжатого воздуха и подаваемых под давлением растворов агропрепаратов.

Одновременно даталоггер *8* передает эти данные на дисплей блока управления *6*, который записывает и направляет их в блок памяти, формирует электронную карту поля. При достижении конца рабочей ветви направляющей *2* ствол *37*, воздействуя на выключатель *19*, закрывает подачу импульсов сжатого воздуха и растворов агропрепаратов.

Линейный актуатор *29* по консольной направляющей *31* извлекает из почвы и перемещает по холостой ветви направляющей *2* пневмогидробур *26* над поверхностью почвы до включателя *18*.

При достижении рамой *1* края поля блок управления *6* отключает подачу электроэнергии в электропривод *5* и останавливает несущую раму *1*. Одновременно он закрывает подачу сжатого воздуха и растворов агропрепаратов в пневмогидробуры *26*, находящиеся на рабочих ветвях направляющих *2*, включает подачу электроэнергии в линейные актуаторы *29*, опуская пневомгидрорбуры *26*, расположеные на рабочих ветвях дополнительных направляющих 40, и поднимает раму *1*.

Затем блок управления *6* включает электропривод *5* ведущих тяговых звездочек и приводные тяговые цепи *23* каждой дополнительной направляющей *40* перемещают дополнительные регулируемые опоры на опорных катках, которые взаимодействуют с почвой, создают тяговое усилие и перемещают уже несущую раму поперек рядков насаждений на смежный необработанный участок поля.

Дополнительные пневмогидробуры *26*, которые, взаимодействуя с почвой, создают тяговое усилие и перемещают раму *1* поперек рядков насаждений на смежный необработанный участок поля, опускают раму *1* на поверхность почвы, ориентируя рабочие ветви направляющих *2* вдоль междурядий насаждений. При этом блок управления *6* включает электропривод *5*, подачу сжатого воздуха в пневмогидробуры *26* рабочих направляющих *2* и начинает движение в обратном направлении.

Обсуждение. Разработанный многофункциональный сельскохозяйственный движитель посредством установки в пневмогидробуры-почвозацепы соответствующих электронных датчиков осуществляет оценку основных физико-механических показателей и агрохимического состава почвы. За время экспозиции пневмогидробуров-почвозацепов в почве в режиме он-лайн на бортовой компьютер подается сигнал, который регулирует через пневмогидробуры подачу соответствующей дозы воды, раствора агрохимикатов, а также формирует электронную карту поля с оценкой его состояния и привязкой к координатам.

Внутрипочвенная обработка импульсами сжатого воздуха посредство вертикального погружения пневмогидробуров-почвозацепов и последующей подачи в корнеобитаемые слои почвы различных агрохимикатов способствует формированию оптимальных условий обмена веществ и энергии, водно-воздушно-тепловых режимов, бездефицитного баланса биофильных элементов, основных почвообразовательных и продукционных процессов, симбиоза растений с почвенными биотой, микроорганизмами и мезофауной и снижению процессов деградации и эрозии сельскохозяйственных угодий, что в полной мере обеспечивает комплексные, оптимально-эффективные, адаптивно-интегрированные условия естественно-природного ресурсоэнергооборота.

Пневмогидробуры-почвозацепы обеспечивают эффективное взаимодействие с почвами различных физико-механических характеристик и агрохимических свойств с минимальными ресурсоэнергозатратами без разрушения корнеобитаемых почвенных горизонтов, совмещая следующие функции:

- зонда – внутрипочвенное сканирование в режиме реального времени пенетрации и агрохимических характеристик корнеобитаемых слоев почвенных горизонтов;
- рыхлителя – внутрипочвенное воздействие импульсами сжатого воздуха с учетом характеристик почвы в корнеобитаемых слоях;
- агроэратора – по результатам внутрипочвенного сканирования подача импульсов сжатого воздуха непосредственно в корневую систему растений;
- форсунки-распылителя – внутрипочвенная подача растворов агробиопрепаратов с учетом результатов сканирования агрохимических характеристик почвы непосредственно в корневую систему растений;
- опоры – вертикально-возвратное внутрипочвенное погружение, устойчивое положение и энергоэффективное самостоятельное перемещение по ним агротехнологического агрегата над поверхностью почвы без воздействия на неё;

– почвозацепа-движителя – внутрипочвенное взаимодействие и перемещение сельскохозяйственного агрегата над поверхностью почвы без воздействия на корнеобитаемые почвенные горизонты и растения.

Выводы.

1. Применяемые в настоящее время в земледелии приемы и технические средства обработки почвы, прежде всего отвальная вспашка с оборотом пласта и движительные системы колесного и гусеничного типа, являются основными агрессивно-негативными факторами, наиболее значимо влияющими на развитие эрозии и деградации почвы.

2. Переход к инновационным ресурсоэнергоэффективным агротехнологическим процессам многофункциональным движителем посредством погружения пневмогидробуров-почвозацепов обеспечивает сканирование пенетрации и агрохимических характеристик корнеобитаемых почвенных слоев, последующее ресурсоэнергоэффективное рыхление, аэрацию, орошение корнеобитаемых слоев почвы и рациональную подачу раствора агрохимикатов без воздействия рабочих органов агрегатов и движителей на поверхность почвы. Это предотвращает развитие процессов деградации, эрозии сельскохозяйственных земель. Значительно увеличивается содержание гумуса в корнеобитаемых слоях.

3 Предлагаемые агротехнологические решения, защищенные патентами, создают возможности и условия в режиме онлайн сканировать почвенный горизонт, осуществлять экспресс анализ характеристик почвы, на его основе подавать в почву необходимую дозу соответствующих препаратов. В результате обеспечиваются оптимальные агротехнические условия для максимальной реализации созданного генетического потенциала продуктивности культивируемых сортов, сокращаются ресурсоэнергозатраты и формируются реальные условия перехода к органическому земледелию.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Доклад о состоянии и исследовании земель сельскохозяйственного назначения Российской Федерации в 2023 году. М.: ФГБНУ «Росинформагротех». 2024. 416 с.

2. Федоренко В.Ф. Трансформация и интеграция процессов и систем земледелия в природный ресурсооборот // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2024. Т. 18. №3. С. 39-48. https://doi.org/10.22314/2073-7599-2024-18-3-39-48

3. Технологии XXI века в агропромышленном комплексе России: Каталог. 4-е изд., доп. М.: Росинформагротех. 2023. 536 с.

4. Старовойтов С.И., Старовойтова Н.П. Интенсивность воздействия газоструйного излучателя на поверхностный слой суглинистой почвы: результаты исследований // Агроинженерия. 2024. № 26 (4). С. 13-18. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-4-13-18

5. Новоселов С.И. Влияние фотохимического воздействия света на подвижность гумусовых веществ и свойств почвы // Агрохимия. 2021. № 12. С. 37-41. EDN: HRRBXG

6. Пыхтин И.Г., Гостев А.В., Нитченко Л.Б. Теоретические основы систематизации обработки почвы в агротехнологиях нового поколения // Земледелие. 2015. № 5. С. 13-15. EDN: UGTHRF

7. Черногаев В.Г., Свирина В.А. Сравнительный анализ эффективности применения различных способов обработки почвы в системе ресурсосберегающих технологий в земледелия // Аграрная наука. 2020. № 11-12. С. 105-107. EDN: MRQOLQ

8. Проворов Н.А., Тихонович И.А. Современное состояние и перспективы развития симбиогенетики // Экологическая генетика. 2019. № 17(1). С. 5-10. EDN: EUYCEX

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

10. Ядрихинский И.В. О значении фундаментальных исследований в решении глобальных экологических проблем // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. № 4 (106) Ч. 2. С. 30-35. https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.106.4.030

11. Ялалетдинов Д.А., Рахимов И.Р., Куликова А.П., Бычков И.В., Кузьмин Д.А., Усик М.О., Толкачев В.А. Моделирование процессов рыхления почвы сжатым воздухом // Челябинский физико-математический журнал. 2024. № 9(1). С. 160-168. EDN: LVCIVQ

12. Сенькевич С.Е., Годжаев З.А., Ильченко Е.Н., Алексеев И.С. Исследование характеристик динамической системы трансмиссии трактора сельскохозяйственного назначения тягового класса 0,9 // Техника и оборудование для села. 2025. № 4. С. 16-20. https://doi.org/10.33267/2072-9642-2025-4-16-20

13. Кондратьева О.В. и др. Анализ производственной инфраструктуры и передовых практик продвижения органической продукции на внутреннем рынке: аналит. обзор. М.: Росинформагротех. 2025. 96 с.

14. Проворова Н. А., Онищук О. П. Эволюционно-генетические основы симбиотической инженерии растений: мини-обзор // Сельскохозяйственная биология. 2018. Том 53. № 3. С. 464–474. https://doi.org/ 10.15389/agrobiology.2018.3.464rus.EDN: EACWHD

15. Федоренко В.Ф., Харитонов, М.П. Смирнов И.Г., Аристов Э.Г. Перспективы роботизации процессов внутрипочвенного полива и подкормки растений // Агроинженерия. 2024. № 26 (1). С. 11-17. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-1-11-17

16. Федоренко В.Ф. Переход к технологическим процессам и техническим системам обработки почвы, интегрированным в природный ресурсооборот // Агроинженерия. 2025. №27(2). С. 30-37. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-2-30-37

17. Вестник испытаний сельскохозяйственной техники. Информационное издание. М.: Росинформагротех. 2025. 95 с.

18. Слюсаренко В. В. Русинов А.В. Федюнина Т. В. Влияние движителей машинно-тракторных агрегатов на урожай сельскохозяйственных культур // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. №3(45). С. 17-28. https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.45.127

19. Гапич Д. С., Токарев В. И., Панчишкин А. П. Технологическая адаптация тракторов в составе почвообрабатывающих агрегатов: монография. Волгоград: ФНЦ агроэкологии РАН. 2024. 156 с.

20. Слюсаренко В.В., Русинов А.В., Федюнина Т.В. Определение площади уплотнения сельскохозяйственных полей движителями машинно-тракторных агрегатов // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 1-3(43). С.35-37. EDN: VJVCMT

21. Федоренко В.Ф., Федоренко А.В., Федоренко И.В. Устройство для внутрипочвенных обработки, аэрации, орошения, удобрения корнеобитаемых слоев почвы и способ внутрипочвенных обработки, аэрации, орошения, удобрения корнеобитаемых слоев почвы таким устройством // Патент на изобретение РФ №2807342. 2023. EDN: QOTGVP

22. Федоренко В.Ф. Устройство для обработки корнеобитаемых горизонтов почв и способ обработки корнеобитаемых горизонтов почв таким устройством // Патент РФ №2807736. 2023. МПК A01879/02/. EDN: HTNOTE

23. de la Cruz V.Y.V., Tantriani, Cheng W., Tawaraya K. Yield gap between organic and conventional farming systems across climate types and sub-types: A meta-analysis // Agricultural Systems. 2023. Vol. 211, 103732. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103732

24. Georgescu-Roegen N. The Entropy Law and the Economic Process. Cambridge, MA. USA: Harvard University Press. 1971. 457 p. http://dx.doi.org/10.4159/harvard.9780674281653

25. Korotchenya V. Ideal final result for agriculture: Striving for sustainability // Proc. 2th International TRIZ Future Conference (TFC). 2022. Vol. 655. P. 405-416. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-17288-5_34

26. Connor D.J. Analysis of farming systems establishes the low productivity of organic agriculture and inadequacy as a global option for food supply // npj Sustainable Agriculture. 2024. Vol. 2, 2. https://doi.org/10.1038/s44264-023-00009-7

REFERENCES

1. Report on the Status and Research of Agricultural Lands in the Russian Federation in 2023. Moscow: Rosinformagrotech. 2024. 416 p. (In Russ.)

2. Fedorenko V.F. Transformation and integration of agricultural processes and systems into the natural resource cycle. Sel'skokhozyaistvennye mashiny i tekhnologii = Agricultural Machinery and Technologies. 2024;18 (3): 39-48 (In Russ.) https://doi.org/10.22314/2073-7599-2024-18-3-39-48

3. 21st Century Technologies in the Agro-Industrial Complex of Russia: Catalog. 4th ed., supplemented. Moscow: Rosinformagrotech. 2023. 536 p. (In Russ.)

4. Starovoitov S.I., Starovoitova N.P. Intensity of the impact made by a gas-jet emitter on the surface layer of the loamy soil: research results. Agroinzheneriya = Agricultural Engineering (Moscow). 2024;26(4):13-18. (In Russ.) https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-4-13-18

5. Novoselov S.I. Effect of photochemical exposure light on the mobility of humus substances and soil properties. Agrokhimiya = Agrohimia = Agricultural Chemistry. 2021;12:37-41. (In Russ.) EDN: HRRBXG

6. Pykhtin I.G., Gostev A.V., Nitchenko L.B. The theoretical fundamentals for the systematization of soil cultivations in agricultural technologies of a new generation. Zemledelie = Land Management. 2015;5:13-15. (In Russ.) EDN: UGTHRF

7. Chernogaev V.G., Svirina V.A. Comparative analysis of the efficiency of application of different methods of tillage in the system of resource-saving agriculture technologies. Agrarnaya nauka = Agrarian Science. 2020;11-12:105-107 (In Russ.) EDN: MRQOLQ

8. Provorov N.A., Tikhonovich I.A. The state of art and prospects for development of symbiogenetics. Ekologicheskaya genetika = Ecological genetics. 2019;17 (1): 5-10. (In Russ.) EDN: EUYCEX

9. Polzikov D.A., V.V. Aleshchenko. On the development strategy for the production of organic products in the Russian Federation Until 2030. Studies on Russian Economic Development. 2024;35(4):575-588. (In Eng.) https://doi.org/10.1134/S1075700724700035

10. Yadrikhinsky I.V. The importance of fundamental research in solving global environmental problems. Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal = International Research Journal. 2021;4 (106)-2:30-35. (In Russ.) https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.106.4.030

11. Yalaletdinov D.A., Rahimov I.R., Kulikova A.P., Bychkov I.V., Kuzmin D.A., Usik M.O., Tolkachev V.A. Simulation of soil loosening processes with compressed air. Chelyabinskii

fiziko-matematicheskii zhurnal = Chelyabinsk Physical and Mathematical Journal. 2024;9(1):160-168. (In Russ.) EDN: LVCIVQ

12. Senkevich S.E., Godzhaev Z.A., Ilchenko E.N., Alekseev I.S. Study of the characteristics of the dynamic transmission system of an agricultural tractor of traction class 0.9. Tekhnika i oborudovanie dlya sela = Machinery and Equipment for Rural Area. 2025;4:16-20 (In Russ.) https://doi.org/10.33267/2072-9642-2025-4-16-20

13. Kondratyeva O.V. et al. Analysis of production infrastructure and best practices for promoting organic products in the domestic market: analytical review. Moscow: Rosinformagrotech. 2025. 96 p.

14. Provorova N. A., Onishchuk O. P. Evolutionary-genetic basis of plant symbiotic engineering: a mini-review. Sel'skokhozyaistvennaya biologiya = Agricultural Biology. 2018; 53 (3):464–474. (In Russ.) https://doi.org/ 10.15389/agrobiology.2018.3.464rus EDN: EACWHD

15. Fedorenko V.F., Kharitonov, M.P. Smirnov I.G., Aristov E.G. Robotization prospects for subsurface irrigation and fertilization of plants. Agroinzheneriya = Agricultural Engineering (Moscow). 2024;26 (1):11-17. (In Russ.) https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-1-11-17

16. Fedorenko V.F. Transition to technological processes and technical systems of soil tillage integrated into natural resource management. Agroinzheneriya = Agricultural Engineering (Moscow). 2025;27(2):30-37 (In Russ.) https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-2-30-37

17. Bulletin of agricultural machinery tests. Information edition. Moscow: Rosinformagrotech. 2025. 95 p. (In Russ.)

18. Sljusarenko V. V., Rusinov A. V., Fedjunina T. V. The influence of the propulsion of tractors and machines to harvest crops. Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal = International Research Journal. 2016;3(45):17-28. (In Russ.) https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.45.127

19. Gapich D. S., Tokarev V. I., Panchishkin A. P. Technological adaptation of tractors as part of tillage units: monograph. Volgograd: Federal Scientific Center of Agroecology of the Russian Academy of Sciences. 2024. 156 p. (In Russ.)

20. Slusarenko V.V., Rusinov A.V., Fedunina T.V. Determination of the seal area of agricultural fields by propulsion of machine-tractor units. Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal = International Research Journal. 2016;1-3(43):35-37 (In Russ.) EDN: VJVCMT

21. Fedorenko V.F., Fedorenko A.V., Fedorenko I.V. Device for subsoil cultivation, aeration, irrigation, fertilization of root-inhabited soil layers and method for subsoil cultivation, aeration, irrigation, fertilization of root-inhabited soil layers using device. Patent on invention RU2807342. 2023. (In Russ.) EDN: QOTGVP

22. Fedorenko B.F., Fedorenko A.V., Fedorenko I.V. Device for treating root-inhabited soil horizons and method for treating root-inhabited soil horizons with such device. Patent on invention RU2807736. 2023. (In Russ.) EDN: HTNOTE

23. de la Cruz V.Y.V., Tantriani, Cheng W., Tawaraya K. Yield gap between organic and conventional farming systems across climate types and sub-types: A meta-analysis. Agricultural Systems. 2023; 211, 103732.(In Eng.) https://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103732

24. Georgescu-Roegen N. The Entropy Law and the Economic Process. Cambridge, MA. USA: Harvard University Press, 1971. 457 p. (In Eng.) http://dx.doi.org/10.4159/harvard.9780674281653

25. Korotchenya V. Ideal final result for agriculture: Striving for sustainability. Proc. 2th International TRIZ Future Conference (TFC). 2022;655:405-416. (In Eng.) URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-17288-5_34

26. Connor D.J. Analysis of farming systems establishes the low productivity of organic agriculture and inadequacy as a global option for food supply. npj Sustainable Agriculture. 2024;2, 2. (In Eng.) https://doi.org/10.1038/s44264-023-00009-7

Об авторе	**About the author**
Федоренко Вячеслав Филиппович академик РАН, д-р техн. наук, главный научный сотрудник, Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, 109428, РФ, г. Москва, 1-й Институтский проезд, дом 5 vim@vim.ru, f@maro.pro; ResearcherID: A-9022-2018, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6398-4463	**Vyacheslav F. Fedorenko** Full Member of the Russian Academy of Sciences, DSc (Engineering), chief researcher, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 109428, Russia, Moscow, 1st Institutsky proezd, 5 vim@vim.ru, f@maro.pro; ResearcherID: A-9022-2018, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6398-4463
Заявленный вклад автора Автор выполнил все функции проекта	**Author's contribution** Single author article - the author fulfilled all the functions in the project
Конфликт интересов Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов и несет ответственность за плагиат	**Conflict of interest** The author declares no conflict of interest and bears responsibility for plagiarism
Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи к публикации	The author has read and agreed to the published version of the manuscript.
Статья поступила в редакцию: 14.04.2026	**Received:** 14.04.2026
Одобрена после рецензирования: 25.06.2026	**Approved after reviewing:** 25.06.2026
Принята к публикации: 11.09.2026	**Accepted for publication:** 11.09.2026

Научная статья
УДК 631.171 DOI 10.24412/2713-2641-2026-3128-24-41

ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ОРГАНИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА КАРТОФЕЛЯ

Антон Михайлович Захаров

Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) - филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, Санкт-Петербург, Россия
zamsznii@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-3501-0543

Аннотация. Органическое сельское хозяйство, как целостная система экономической деятельности, охватывает полный цикл производства – от выращивания сырья до глубокой переработки и выпуска готовой продукции. Включает в себя принципы минимизации негативного воздействия на окружающую среду, сохранения здоровья людей, а также поддержание и восстановление естественного плодородия почв за счет отказа от применения синтетических пестицидов и минеральных удобрений. Однако, на сегодняшний день существующие технологические решения в органическом производстве носят фрагментарный характер, формируемые на их основе методики зачастую не подкреплены должной методологической и экспериментальной базой, а требования органического земледелия просто накладываются на традиционные агротехнические приёмы. Цель работы – обоснование и разработка технологии органического производства картофеля, обеспечивающей повышение урожайности и качество продукции при снижении негативного воздействия на окружающую среду. В статье обоснованы технологические процессы, требующие выбора рациональных вариантов технологических операций и средств их реализации. К ним относятся внесение твёрдых органических удобрений, удаление сорной растительности и обработка биологическими препаратами. Представлена информационная модель технологии и предложен метод системно-структурного проектирования технологий органического производства. Разработана многоуровневая система критериев, позволяющая производить рациональный выбор вариантов элементов технологии. Выбор рациональных вариантов способов реализации технологических операций осуществляется по критерию урожайности; выбор рациональных вариантов используемых машин и агрегатов – по критериям производительности и прямых эксплуатационных затрат. Для оценки технико-экономической эффективности технологии в целом и выбора лучшего варианта разработаны два общесистемных критерия оценки: критерий экономической эффективности и критерий экологической безопасности. Разработаны два варианта технологии: технология с применением выбранных из баз данных рациональных вариантов или разработанных в ИАЭП технических средств и технология с применением базовых технических средств. Вариант 1 технологии превосходит вариант 2 по критерию экономической эффективности на 9,7%, за счет повышения урожайности картофеля и снижения потерь при хранении. По критерию экологической безопасности вариант 1 на 59% превосходит вариант 2 за счет снижения диффузного загрязнения водных объектов в связи с увеличением глубины залегания уплотненного слоя почвы при применении в процессе междурядной обработки технологического приема глубокого рыхления междурядий.

Ключевые слова: органическое производство, картофель, технология, урожайность, негативное воздействие, окружающая среда.

Для цитирования: Захаров А.М. Обоснование и разработка технологии органического производства картофеля // АгроЭкоИнженерия. 2026. № 3(128). С. 24-42 https://doi.org/10.24412/2713-2641-2026-3128-24-41

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИАЭП-филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ FGUN-2022-0010 «Разработать экологически чистые технологии, комплексы машин и оборудование для управления сельскохозяйственными экосистемами при интенсивном и органическом производстве сельскохозяйственной продукции».

Research article
Universal Decimal Code: 631.171

JUSTIFICATION AND DEVELOPMENT OF ORGANIC POTATO CULTIVATION TECHNOLOGIES

Anton M. Zakharov

Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) – branch of FSAC VIM, Saint Petersburg, Russia
zamsznii@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-3501-0543

Abstract. Organic agriculture, as an integrated economic system, covers the entire production cycle, from crop cultivation to advanced processing and final products. Its core principles involve minimizing environmental impacts, protecting human health, and sustaining natural soil fertility without synthetic pesticides or mineral fertilizers. However, current technological solutions in organic farming remain fragmented. The resulting methods often lack a proper methodological and experimental foundation. Consequently, the requirements of organic farming are merely superimposed onto conventional agricultural practices.This study aimed to develop and substantiate an organic potato cultivation technology capable of increasing tuber yield and quality while minimizing environmental impacts. The article details the underlying technological processes, emphasizing the selection of optimal operations alongside compatible machinery and equipment. The core field operations evaluated include the application of solid organic fertilizers, mechanical weed control, and biological plant protection treatments. Finally, the paper introduces an informational model of the proposed technology and outlines a system-structural design method for organic farming practices. A multilevel criteria system was developed to facilitate the optimal selection of individual technology elements. Specific operational configurations were evaluated based on crop yield, while machinery and field units were selected according to productivity and direct operating costs. To assess the overall techno-economic efficiency of the technology and identify the optimal configuration, two system-wide evaluation criteria were established: economic efficiency and environmental safety. Two variants of the technology have been developed. Variant 1 uses rational options selected from databases or machines and equipment developed in IEEP. Variant 2 uses basic machines and equipment. Variant 1 surpasses Variant 2 in terms of economic efficiency by 9.7%, by increasing potato yields and reducing tuber storage loss. By environmental safety criterion, Variant 1 is 59% superior to Variant 2 owing to a lower diffuse pollution of water bodies. This environmental benefit is attributed to deeper occurrence of the compacted soil layer achieved through deep subsoiling between the crop rows, which effectively mitigates subsoil compaction.

Keywords: organic production, potatoes, technology, yield, negative impact, environment.

For citation: Zakharov A.M. Substantiation and development of technology for organic potato production // AgroEcoEngineering. 2026;3(128): 24-42 (In Russ.) https://doi.org/10.24412/2713-2641-2026-3128-24-41

Acknowledgements: The study was a part of research work FGUN-2025-0010 "To develop environmentally friendly technologies, complexes of machines and equipment for managing agricultural ecosystems in intensive and organic agricultural production" within the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of Russia for IEEP - branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM

Введение. В настоящее время развитие производства органической сельскохозяйственной продукции – одно из приоритетных направлений аграрной политики во многих странах, этому сектору уделяют особое внимание в 190 государствах мира. Высокий уровень интереса обусловлен тем, что концепция органического земледелия органично встраивается в глобальную повестку устойчивого развития. Она отвечает современным запросам общества на экологически ответственное производство и способствует переходу к сбалансированным, ресурсосберегающим моделям в сфере производства продукции [1].

Органическое сельское хозяйство – это не просто отдельный сегмент агропромышленного комплекса, а целостная система экономической деятельности, охватывающая полный цикл: от выращивания сырья до глубокой переработки и выпуска готовой продукции. В её основе лежат специальные подходы, технологии и методики, которые принципиально отличаются от традиционных индустриальных моделей. В частности, применяемые практики направлены на минимизацию негативного воздействия на окружающую среду, сохранение здоровья людей, а также на поддержание и восстановление естественного плодородия почв – одного из важнейших невозобновляемых ресурсов [2, 3].

Среди ключевых принципов органического земледелия – отказ от применения синтетических пестицидов и минеральных удобрений в пользу естественных способов поддержания плодородия: использования органических удобрений (компостов, навоза, сидератов), грамотного севооборота, биологических методов защиты растений и других приёмов, позволяющих сохранять биоразнообразие и улучшать структуру почвы. Благодаря такому комплексному подходу удаётся производить продукты питания с более высокими потребительскими и экологическими характеристиками: они содержат меньше остаточных загрязняющих веществ, зачастую отличаются лучшим вкусом и питательной ценностью, а спрос на такую продукцию в последние годы стабильно растёт, отражая изменение потребительских предпочтений и повышение уровня экологической грамотности населения [4, 5].

В России развитие органического сельского хозяйства закреплено на государственном уровне и имеет чёткую стратегическую основу. Так, распоряжением Правительства РФ от 4 июля 2023 года № 1788-р утверждена Стратегия развития производства органической продукции в Российской Федерации до 2030 года[7]. Этот документ задаёт долгосрочные ориентиры развития отрасли, определяет целевые показатели и приоритетные направления поддержки производителей. Для практической реализации стратегии был принят отдельный

[7]Распоряжение Правительства РФ от 4 июля 2023 года № 1788- р «Об утверждении Стратегии развития производства органической продукции в Российской Федерации до 2030 г.» [Электронный ресурс] Режим доступа: https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/407297286/ (дата обращения 02.06.2026 г.)

План мероприятий – он утверждён распоряжением Правительства РФ от 20 января 2024 года № 101-р[8]. Таким образом, государство формирует не только нормативную базу, но и конкретные механизмы поддержки: от сертификации и контроля качества до стимулирования инвестиций и развития инфраструктуры рынка органической продукции [6].

Текущая динамика развития сектора в России демонстрирует устойчивый рост. По данным за 2024 год, площадь сельскохозяйственных угодий, используемых под органическое земледелие, достигла порядка 1,5 млн га. При этом ежегодные темпы расширения посевных площадей сохраняются на уровне 8-12%, что свидетельствует о поступательном развитии отрасли и вовлечении в неё новых хозяйств. Параллельно увеличивается и объём рынка: в 2024 году он составил около 27,6 млрд рублей, продемонстрировав годовой прирост на 22,1%.

Согласно оценке аналитического агентства NeoAnalytics, потенциальная ёмкость российского рынка экологической и органической продукции составляет порядка 300 млрд рублей. При текущем объёме в 27,6 млрд рублей это означает, что рынок заполнен лишь на 9,2% и, следовательно, обладает значительным потенциалом для дальнейшего роста[9]. Среди ключевых факторов, способных стимулировать развитие отрасли, эксперты выделяют повышение информированности потребителей, совершенствование механизмов сертификации, расширение мер государственной поддержки, а также развитие экспортного направления.

При этом структура рынка пока остаётся несбалансированной: значительную долю – около 65% – занимает импортная продукция. Это говорит о том, что внутренний спрос на органические товары пока опережает возможности отечественного производства. С одной стороны, это отражает высокий потребительский интерес, с другой – указывает на необходимость ускоренного наращивания производственных мощностей, внедрения современных технологий, подготовку квалифицированных кадров и создание условий для выхода на рынок новых производителей, в том числе малых фермерских хозяйств [7, 8].

Картофель – ключевой продукт в рационе человека: он богат полезными веществами, помогает предупреждать ряд заболеваний и подходит для диетического питания. В соответствии со «Стратегией развития агропромышленного и рыбохозяйственного комплексов РФ на период до 2030 года» планируется достигнуть уровня самообеспечения картофелем 95%[10]. Федеральный проект «Развитие овощеводства и картофелеводства» ставит задачу увеличить объёмы производства картофеля в организованном секторе на 20% относительно показателей 2020 года[11]. Для органического производства картофель также

[8] Распоряжение Правительства РФ от 20 января 2024 г. № 101-р «Об утверждении плана мероприятий по реализации Стратегии развития производства органической продукции в РФ до 2030 г.» [Электронный ресурс] Режим доступа: https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/407297286/ (дата обращения 02.06.2026 г.)

[9] Обзор российского рынка органической продукции. Исследования компании NeoAnalytics. [Электронный ресурс] Режим доступа: https://foodmarket.spb.ru/archive/2025/223549/223558/?ysclid=mu1379hd7291512397 (дата обращения 03.06.2026 г.)

[10] Распоряжение Правительства РФ от 08.09.2022 N 2567-р (ред. от 19.12.2025) «Об утверждении Стратегии развития агропромышленного и рыбохозяйственного комплексов Российской Федерации на период до 2030 года». [Электронный ресурс] Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_426435/ (дата обращения 05.06.2026 г.)

[11] Паспорт государственной программы (комплексной программы) Российской Федерации «Государственная программа развития сельского хозяйства и регулирования рынков

представляет высокий интерес, так как является не только самостоятельным продуктом питания, но имеет высокие сырьевые возможности и находит широкое применение в виде вторичных продуктов, чипсов, сухого пюре, полуфабрикатов и др.

При этом текущее состояние научно-технической базы для органического растениеводства нельзя назвать достаточным. Существующие технологические решения носят фрагментарный характер, а формируемые на их основе методики зачастую не подкреплены должной методологической и экспериментальной базой: нередко требования органического земледелия просто накладывают на традиционные агротехнические приёмы. Особые сложности возникают при реализации ключевых для органического земледелия операций – внесения твёрдых органических удобрений, борьбы с сорняками и обработки биологическими препаратами. Применяемые в интенсивном земледелии технические средства и методы здесь недостаточно эффективны, поэтому необходима разработка технологий и специализированных технических средств. Таким образом, создание наукоёмких, системно спроектированных технологий для органического производства является важной задачей научного, социального и хозяйственного характера. Её решение будет способствовать стабильному развитию органического картофелеводства и поможет уменьшить негативное воздействие на агроэкосистему и окружающую среду в целом.

Цель работы – обоснование и разработка технологии органического производства картофеля, обеспечивающей повышение урожайности и качества продукции при снижении негативного воздействия на окружающую среду.

Материалы и методы. В соответствии со Стратегией развития производства органической продукции в РФ до 2030 года представлены перспективы развития органического направления и сценарии наращивания объемов производства органической продукции (рис. 1).

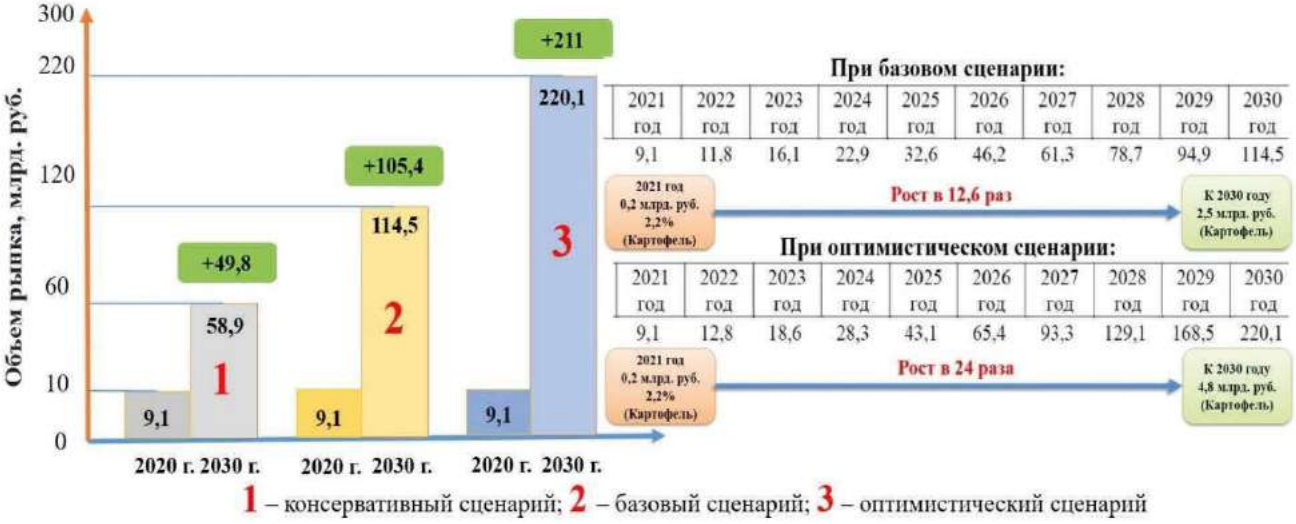


Рис. 1. Сценарии развития согласно Стратегии производства органической продукции в Российской Федерации до 2030 года

Fig. 1. Development scenarios according to the Strategy for Organic Production in the Russian Federation through 2030

сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия» (утв. решением Правительства РФ от 03.09.2025 N ДП-П11-32623) [Электронный ресурс] Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_513951/5cabd63829e5beebf9aa3d174498cf483a25f04b/ (дата обращения 09.06.2026 г.)

Стратегией предусмотрено увеличение объемов производства с 9,1 млрд. рублей в 2020 г. до 114,5 млрд. в 2030 г. (базовый сценарий), в том числе органического картофеля с 0,2 до 2,5 млрд. рублей (в 12,6 раза). Вместе с тем уровень научно-технологического обеспечения органического производства продукции растениеводства в настоящее время не позволяет достигнуть требуемых показателей роста, поскольку применяемые технологии возделывания органических сельскохозяйственных культур не имеют методологического и экспериментального обоснования, а агробиотехнологии при этом используются лишь на 2% потенциала.

Проведенный комплексный анализ структуры типовых технологий интенсивного возделывания картофеля на их соответствие требованиям к выполнению технологических операций и агротехнических приёмов органического производства (ОП) позволил обосновать технологические процессы (ТП), требующие выбора рациональных вариантов технологических операций и средств их реализации из существующих или разработки новых машин и рабочих органов [9-12]. К таким процессам относятся: внесение органических удобрений, удаление сорных растений (автоматизированная прополка), очистка клубней от почвы и обработка биологическими препаратами перед хранением и посадкой, так как их выполнение технологическими приемами и техническими средствами из интенсивного производства картофеля недостаточно эффективно [13-16]. На наш взгляд, базовую технологию ОП картофеля рационально представить в виде 6 основных технологических процессов (ТП), которые включают в себя перечень технологических операций и способов их выполнения (рис. 2).

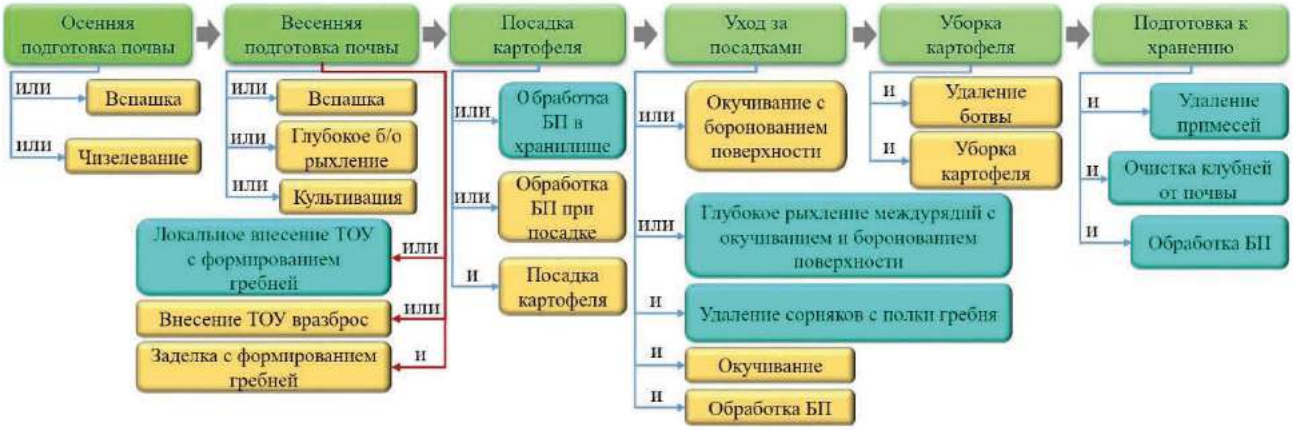


Рис. 2. Структурная схема базовой технологии органического производства картофеля
Fig. 2. Flow chart of the basic technology for organic potato production

Одной из важнейших идеологических задач ОП является снижение негативного воздействия на окружающую среду. Анализ видов негативного воздействия при выращивании картофеля позволил выделить наиболее значимые: уплотнение почвы и диффузное загрязнение водных объектов. Природно-климатические условия СЗФО, особенности гидрографической сети и действующие рекомендации по защите водных объектов на водосборе Балтийского моря с необходимостью планомерного снижения загрязнения определяют в качестве основного экологического критерия показатель диффузного загрязнения водных объектов.

Задача обоснования средств производства, технологических операций и технических средств в технологии ОП картофеля может быть решена путем разработки системных критериев, моделей и алгоритмов, обеспечивающих возможность выбора их рациональных

вариантов из сформированных баз данных и вновь разработанных машин для достижения максимальной урожайности и минимальной себестоимости культуры при минимальном экологическом воздействии на окружающую среду.

Результаты. Технология производства картофеля является сложной многопараметрической системой и может быть представлена в виде информационной модели (рис 3).

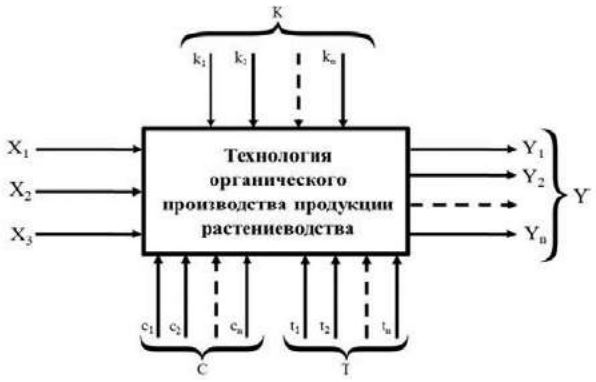


Рис. 3. Информационная модель технологии органического производства
Fig. 3. Information model of an organic production technology

Входами модели являются: X_1 – Хозяйственные условия (регион возделывания, площадь поля и т.п.); X_2 – Почвенные условия; X_3 – Культура, планируемая к возделыванию (картофель), а также назначение товарной продукции. Группа неуправляемых факторов представлена климатическими условиями (сумма положительных температур, количество осадков и т.д.), $K = (k_1, k_2 \ldots k_n)$. Группа управляемых факторов, представлена двумя блоками: блок средств производства (сорт, удобрения, средства защиты растений) $C = (c_1, c_2 \ldots c_n)$ и блок технологических процессов (подготовка почвы, посадка, уход за посадками и т.д.), $T = (t_1, t_2 \ldots t_n)$. Блок ТП в дальнейшем разделен на технологические операции и комплексы машин для их выполнения. Выходами представленной информационной модели являются показатели целевой функции технологии (урожайность, качество продукции, сохранность, диффузная нагрузка и т.д.), $Y = (y_1, y_2 \ldots y_n)$. Согласно описанной модели, сочетанию конкретных факторов X и K будут соответствовать рациональные значения факторов C и T, обоснованных в процессе проектирования технологии с целью получения заданных показатели целевой функции технологии Y.

Основные этапы проектирования машинной технологии ОП включают в себя обоснование рациональной структуры объектов технологии: (1) Почвенно-климатические и хозяйственные условия (ПКХУ); (2) Система средств производства – сорта, удобрения, средства защиты растений (ССП); (3) Система технологических процессов, операций и машин (СТПОМ). Технология осуществима, если свойства её объектов совместимы между собой. Проведенный структурно-функциональный анализ объектов технологии позволяет установить область их совместного применения с учетом ряда ограничений для того или иного объекта, а эффективное функционирование технологии обеспечивается за счет совместного использования объектов с заданными свойствами. Такое условие выражается отношением:

$$T \in \{ПКХУ \cap ССП \cap СТПОМ\}; \quad (1)$$

Предлагаемый метод системно-структурного проектирования технологий ОП – это процесс синтеза или подбора оптимальных, согласно обоснованным системным критериям и законодательным требованиям средств производства, способов и оборудования для выполнения технологических операций в технологических процессах ОП картофеля, с последующим выходом на технологию.

Для достижения максимальной эффективности технологии (Т) по показателям урожайности, объёма выращенной и сохраненной продукции, диффузной нагрузки на водные объекты необходимо сочетание рациональных средств производства, $С_{пр}$; способов выполнения технологических операций и реализующих эти операции машинно-тракторных агрегатов (МТА) для выполнения технологических операций и технологических процессов (ТО и ТП); а также установка рациональных параметров и режимов работы применяемых технических средств (ПиРТС). Технология может быть выражена как:

$$T = \mathrm{f}(C_{пр}, TOuTП, ПиРТС) \quad (2)$$

Разработан генеральный алгоритм (ГА) проектирования машинных технологий ОП картофеля. ГА включает в себя индивидуальные алгоритмы выбора рациональных вариантов объектов технологии и их связи между собой. При разработке ГА использовались две основные алгоритмические конструкции – это конструкция следования и конструкция цикла. На первом этапе ГА необходимо провести анализ ПКХУ. После их определения и фиксации, происходит переход к выбору средств производства по индивидуальным алгоритмам и критериям выбора. Далее следует переход к выбору способа выполнения ТО и МТА для каждого ТП также по индивидуальным алгоритмам и частным критериям выбора. Завершающим шагом ГА является расчет значений общесистемных критериев оценки технологии в целом, после чего происходит формирование технологической карты на возделывание картофеля согласно требований к ОП [17].

Выбор рациональных вариантов средств производства, таких как семенной материал, удобрения и биопрепараты (БП), проводится согласно разработанной системе критериев (рис. 4) из баз данных №RU2023623158 и №RU2024622581, используя разработанные алгоритмы выбора и программы для ЭВМ №RU2021663634 и №RU2021667687.



Рис. 4. Критерии выбора средств органического производства картофеля
Fig. 4. Criteria for selecting inputs for organic potato production

В состав технологии ОП картофеля входит шесть ТП: осенняя подготовка почвы ($ТП_1$); весенняя подготовка почвы ($ТП_2$); посадка ($ТП_3$); уход за посадками ($ТП_4$); уборка ($ТП_5$) и подготовка к хранению товарной продукции ($ТП_6$). Каждый из ТП включает в себя индивидуальный состав ТО, которые могут выполняться различными вариантами технологических приемов (способов) и МТА, для оценки и выбора которых разработана многоуровневая система критериев (рис 5).

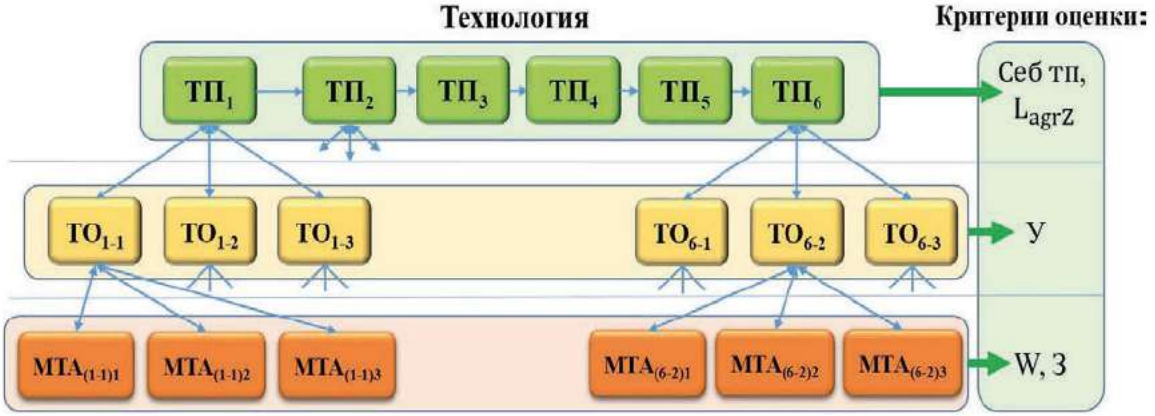


Рис. 5. Структурная схема многовариантной технологии органического производства картофеля

$Себ_{ТП}$ – себестоимость товарного картофеля; L_{agrZ} – диффузная нагрузка на водные объекты; У – урожайность картофеля; W – производительность; З *– прямые эксплуатационные затраты*

Fig. 5. Structural diagram of a multi-option technology for organic potato production

Seb_{TP} – self-cost of marketable potatoes; L_{agrZ} – diffuse load on water bodies; Y – potato yielding capacity; W – productivity; Z – direct operating costs

Выбор рациональных вариантов способов реализации ТО осуществляется по критерию урожайности. Выбор рациональных вариантов используемых при этом машин и агрегатов проводится по критериям производительности и прямых эксплуатационных затрат.

Для оценки технико-экономической эффективности технологии в целом и выбора лучшего варианта разработаны два общесистемных критерия оценки: критерий экономической эффективности и критерий экологической безопасности.

Критерий экономической эффективности выражен через показатель себестоимости товарной продукции, реализованной в течение всего межсезонного периода с учетом подготовки её к хранению:

$$Себ_{тп} = \frac{З_{общ} + З_{хр}}{V_{прод} \cdot к_{сох}}, руб/т, \quad (3)$$

где $З_{общ}$ – совокупные затраты денежных средств на реализацию технологии, руб; $З_{хр}$ – затраты на послеуборочную обработку перед хранением, руб; $V_{прод}$ – объём выращенной продукции, т; $К_{сох}$ – коэффициент сохранности продукции.

Коэффициент сохранности продукции ($К_{сох}$) будет иметь вид:

$$\kappa_{сох} = \frac{V_{прод-сох}}{V_{прод}}, \quad (4)$$

где $V_{прод-сох}$ – объём выращенной и сохраненной продукции, т.

Совокупные затраты денежных средств на реализацию технологии рассчитываются по ГОСТ 35235-2024 «Машинные технологии для растениеводства. Методы экономической оценки. Порядок проведения испытаний».

Критерий экологической безопасности выражается через значение показателя диффузной нагрузки на водные объекты с учетом коэффициента, учитывающего глубину залегания уплотненного слоя почвы [18, 19]:

$$L_{agrZ} = L_{agr} \cdot Kz, \text{ кг}, \quad (5)$$

где Kz – коэффициент, учитывающий глубину залегания уплотненного слоя почвы.

Для определения диффузного загрязнения водных объектов (L_{agr}) применялась методика, разработанная в ИАЭП - филиале ФГБНУ ФНАЦ ВИМ совместно с ИНОЗ РАН, в которой загрязнение представлено выражением:

$$L_{agr} = f(M_{soil}, M_{org}, A_i, \alpha, K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6), \quad (6)$$

где: M_{soil} и M_{org} – содержание биогенного вещества в пахотном слое почвы и доза внесения органических удобрений на поле, кг/га; A_i – площадь поля, м^2; α – коэффициент попадания биогенных веществ в сток с учетом усвоения органических удобрений растениями; K_1 – коэффициент, характеризующий вынос биогенных веществ из пахотного слоя почвы; K_2 – коэффициент удаленного контура сельскохозяйственных угодий от гидрографической сети; K_3 – коэффициент, характеризующий тип почв; K_4 – коэффициент, характеризующий механический состав почв; K_5 – коэффициент, учитывающий структуру сельхозугодий, K_6 - коэффициент, учитывающий использование наилучших доступных технологий (НДТ) применения органических удобрений [20, 21].

Влияние глубины залегания уплотненного слоя почвы Kz на диффузную нагрузку определяется по эмпирической зависимости:

$$K_Z = 1{,}26 - 0{,}027 \cdot x_c, \quad (7)$$

где x_c – глубина залегания уплотненного слоя почвы, см.

Следует отметить, что представленные результаты позволят формировать машинные технологии с учетом нового, научно обоснованного критерия экологической безопасности, выраженного через показатель диффузной нагрузки на водные объекты от агропроизводства, с учетом коэффициента, учитывающего глубину залегания уплотненного слоя почвы.

Обсуждение. Для формирования опытной технологии органического производства картофеля и проведения её эколого-экономической оценки был применен вновь

разработанный метод проектирования. С использованием обоснованных критериев выбраны из баз данных рациональные варианты средств производства: сорт – Удача, раннеспелый, столового назначения, умеренно восприимчив к фитофторозу по ботве и клубням, биологические препараты – Картофин и Флавобактерин для защиты от болезней и органическое удобрение – Биагум, биологически активное органическое удобрение на основе птичьего помета, приготовленное промышленным способом в биоферментаторе, созданном в ИАЭП.

Структура ТП сформирована из рациональных вариантов ТО и МТА, выбранных из соответствующих баз данных или разработанных в ИАЭП новых технических средств и технологических приемов на основе обоснованных критериев. (рис. 6).

При обосновании рациональной структуры средств производства, а также ТО и технических средств в процессах ОП картофеля использованы результаты экспериментальных исследований влияния их вариантного состава на показатели почвенного состояния, урожайности, качества картофеля, экологической безопасности и экономической эффективности. Исследования проведены в период 2018-2022 и 2024-2025 годов на опытном поле ИАЭП в полевом севообороте органического земледелия.

Разработаны два варианта технологии: вариант 1 (В1) – технология ОП картофеля с применением выбранных из баз данных рациональных вариантов или разработанных в ИАЭП технических средств, и вариант 2 (В2) – технология ОП картофеля с применением базовых технических средств [22].



Рис. 6. Структурные схемы технологий органического производства с вновь разработанным и базовым составом технических средств

Fig. 6. Flowcharts of organic production technologies using the newly developed and baseline sets of equipment

Обоснованные рациональные варианты средств производства, а также способы выполнения ТО и соответствующие технические средства использованы при разработке технологической карты ОП картофеля.

В соответствии с разработанным методом проведен расчет общесистемных критериев оценки технологий ОП с базовым и вновь разработанным составом технических средств, результаты расчета представлены в таблице. Пример расчета выполнен для К(Ф)Х с

площадью возделывания органического картофеля 10 га и расчетной урожайностью для В1 – 22,4 т/га и для В2 – 19,8 т/га.

Таблица. Исходные данные и расчетные значения критериев оценки вариантов технологии органического производства картофеля

Table. Baselline data and calculated values of evaluation criteria for organic potato production technology options

№	Наименование показателя, ед. измерения	Обозначение	В1 - технология ОП с разработанным составом тех. средств	В2 - технология ОП с базовым составом тех. средств
1	Объём выращенной продукции, т	$V_{прод}$	224 (22,4 т/га)	198 (19,8 т/га)
2	Совокупные затраты денежных средств на реализацию технологии, руб.	$З_{общ}$	4494368	4484736
3	Затраты на послеуборочную обработку перед хранением, руб.	$З_{хр}$	636323	-
4	Коэффициент сохранности продукции	$к_{сох}$	0,81	0,73
5	Себестоимость товарной продукции, руб./т	$Себ_{ТП}$	28277,61	31027,64
6	Диффузная нагрузка, кгN/га	L_{agr}	14,69	14,69
7	Глубина залегания уплотненного слоя почвы, см	x_c	30	20
8	Коэффициент влияние глубины залегания уплотненного слоя почвы	Kz	0,45	0,72
9	Диффузная нагрузка с учетом глубины залегания уплотненного слоя почвы, кгN/га	L_{agrZ}	6,6	10,5

Вариант 1 технологии ОП с разработанным составом технических средств превосходит вариант 2 технологии с их базовым составом по критерию экономической эффективности на 9,7%, за счет повышения урожайности картофеля при различном составе технических средств возделывания и снижения потерь при хранении с применением перед закладкой на хранение двух технологических операций – сухой очистки картофеля и обработки клубней БП. По критерию экологической безопасности вариант 1 на 59% превосходит вариант 2 за счет снижения диффузного загрязнения водных объектов в связи с увеличением глубины залегания уплотненного слоя почвы при применении в процессе междурядной обработки технологического приема глубокого рыхления междурядий.

Выводы. Производство органической сельскохозяйственной продукции – это быстроразвивающаяся форма хозяйствования, подразумевающая применение инновационных природоподобных агротехнологий, направленных на получение экологически чистых продуктов питания с минимизацией антропогенного воздействия на параметры окружающей среды. В соответствии со Стратегией развития производства органической продукции в РФ до 2030 года предусмотрено увеличение объемов ее производства с 9,1 млрд. рублей в 2020 г. до 114,5 млрд. в 2030 г. (базовый сценарий). Вместе с тем уровень научно-технологического обеспечения органического производства

продукции растениеводства в настоящее время не обеспечивает требуемых показателей роста, поскольку применяемые технологии возделывания органических сельскохозяйственных культур не имеют методологического и экспериментального обоснования, а сложились путем наложения требований органического производства на традиционную агротехнику, агробиотехнологии при этом используются лишь на 2% потенциала. Решение проблемы в значительной степени обеспечит обоснование и разработку наукоемких технологий органического производства на основе системных методов проектирования, а также создание эффективных технических средств.

Разработан метод системно-структурного проектирования машинных технологий ОП картофеля. Технология при этом представляется в виде многопараметрической системы, включающей в себя следующие объекты (подсистемы): подсистему почвенно-климатических и хозяйственных условий; подсистему средств производства – это сорта, удобрения, средства защиты растений; подсистему технологических процессов, операций и машин. Метод включает в себя алгоритм выбора оптимальных, согласно обоснованным системным критериям и законодательным требованиям, вариантов средств производства, способов и оборудования для выполнения технологических операций в технологических процессах ОП картофеля для заданных почвенно-климатических и хозяйственных условий, с последующим выходом на технологию. Обоснованы следующие критерии оптимизации структуры объектов технологии. Для подсистемы средств производства: сорта – это назначение товарной продукции, группа спелости, допуск заявителя, товарная урожайность, устойчивость к заболеваниям); биологические препараты – это группа и объект борьбы, норма и способ применения, агрегатное состояние; удобрения – это органические удобрения, содержание N: P: K, норма внесения. Для подсистемы технологических процессов, операций и машин: способ реализации ТО – это урожайность; машины и агрегаты – это производительность, прямые эксплуатационные затраты. Для комплексной оценки экономической эффективности и экологической безопасности технологии в целом обоснованы два общесистемных критерия: $Себ_{ТП}$ – себестоимость товарной продукции с учетом хранения, руб/т; L_{agrZ} – диффузная нагрузка на с разработанным методом проектирования сформирована технология ОП картофеля в условиях Северо-Западного региона РФ. Согласно критериям и алгоритмам выбора средств производства обоснованы: сорт картофеля, система питания на основе твердых органических удобрений (ТОУ) и БП. Обоснованы рациональные варианты способов выполнении ТО и технических средства для их реализации. Проведена эколого-экономическая оценка по критериям себестоимость товарной продукции с учетом хранения и диффузной нагрузки с учетом показателя глубины залегания уплотненного слоя почвы. Вариант 1 технологии ОП с разработанным составом технических средств превосходит Вариант 2 технологии с их базовым составом по критерию экономической эффективности на 9,7%, за счет применения перед закладкой на хранение двух технологических операций, по сухой очистке картофеля и обработке клубней БП. Применение данных технических средств повышает коэффициент сохранности продукции, что на выходе позволяет получить больший объем продукции с более низкой себестоимостью. По критерию экологической безопасности вариант 1 на 59% превосходит вариант 2 за счет применения в процессе междурядной обработки технологической операции глубокого рыхления междурядий, позволяющей снизить диффузное загрязнение водных объектов путем увеличения глубины залегания уплотненного слоя почвы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Мистратова Н.А., Ступницкий Д.Н., Яшин С.Е. Органическое земледелие в России (обзорная статья) // Вестник КрасГАУ. 2021. № 11 (176). С. 100-107. https://doi.org/10.36718/1819-4036-2021-11-100-107

2. Михайлушкин П.В., Алиева А.Р. Органическое земледелие - направление перехода к «Зеленой» экономике в России // Международный сельскохозяйственный журнал. 2020. № 2. С. 17-19. https://doi.org/10.24411/2587-6740-2020-12022

3. Лобачевский Я.П. Научное обеспечение приоритетных технологий агропромышленного комплекса Российской Федерации // Вестник Российской академии наук. 2024. Т. 94. № 3. С. 275-282. https://doi.org/10.31857/S0869587324030102

4. Бондаренко А.М., Качанова Л.С., Челбин С.М. Развитие рынка органической продукции в обеспечении технологического суверенитета РФ // Дальневосточный аграрный вестник. 2023. Т. 17. № 4. С. 144-155. https://doi.org/10.22450/1999-6837-2023-17-4-144-155

5. Лобачевский Я.П., Лачуга Ю.Ф., Измайлов А.Ю., Шогенов Ю.Х. Научно-технические достижения агроинженерной науки в условиях цифровизации сельского хозяйства // Российская сельскохозяйственная наука. 2025. № 3. С. 45-53. https://doi.org/10.31857/S2500262725030081

6. Кондратьева О.В., Войтюк В.А., Слинько О.В., Полухин А.А. Состояние и тенденции развития органического сельского хозяйства в Российской Федерации // Техника и оборудование для села. 2025. № 5 (335). С. 2-5. https://doi.org/10.33267/2072-9642-2025-5-2-5

7. Войтюк В.А., Кондратьева О.В., Слинько О.В. Органическое сельское хозяйство в России: вызовы и возможности // АгроЭкоИнженерия. 2024. № 3 (120). С. 19-32. https://doi.org/10.24412/2713-2641-2024-3120-19-32

8. Чеха А.Ф. Органическая продукция: основные тенденции развития рынка // Наука без границ. 2021. № 3 (55). С. 84-90. EDN: BWVJTZ

9. Старовойтов В.И., Старовойтова О.А., Манохина А.А. Проблемы органического земледелия в картофелеводстве // Актуальные вопросы экономики и агробизнеса. Сб. статей IX Межд. науч.-практ. конф. (Брянск, 1-2 марта 2018 г.). Брянск: Брянский ГАУ. 2018. С. 404-411. EDN: YALDOP

10. Старовойтова О.А., Старовойтов В.И., Манохина А.А. Технология применения удобрений при выращивании органического картофеля // Инновационные технологии в полевом и декоративном растениеводстве. Сб. статей по матер. III Всеросс. (нац.) науч.-практ. конф. (Курган, 8 апреля 2019 г.). Курган: КГУ. 2019. С. 235-240. EDN: MSCOCA

11. Логинов Г.А., Степанов А.Н., Орешин Е.Е., Захаров А.М. Результаты производственных испытаний машины для сухой очистки картофеля // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2012. № 83. С. 47-52. EDN: TFSFST

12. Орешин Е.Е., Захаров А.М. Эффективность использования блока сухой очистки при подготовке к реализации продовольственного картофеля // Молочнохозяйственный вестник. 2012. № 4 (8). С. 45-51. EDN: PULZFN

13. Смелик В.А., Давудзай М.А. Исследование рабочего процесса машины для локального внесения ферментированных органических удобрений // Аграрный вестник Верхневолжья. 2023. № 1(42). С. 97-103. EDN: ZZLKRC

14. Старовойтова О.А., Старовойтов В.И., Манохина А.А. Эффективная борьба с сорняками в органическом земледелии // Научные инновации - аграрному производству. Матер. Межд. науч.-практ. конф. (Омск, 21 февраля 2018 г.). Омск: Омский ГАУ. 2018. С. 402-411. EDN: XMOLSH

15. Орешин Е.Е., Степанов А.Н., Захаров А.М. Повышение эффективности сухой очистки картофеля щеточными валами // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2013. № 31. С. 214-220. EDN: SBYQZZ

16. Джабборов Н.И., Захаров А.М., Зыков А.В. Оценка эффективности применения аэродинамического способа для предреализационной обработки картофеля // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2018. № 95. С. 136-143. EDN: USSBTS

17. Захаров А.М., Устроев А.А., Мурзаев Е.А., Комоедов А.Д. Методы проектирования технологий органического производства продукции растениеводства // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2025. № 19 (1). С. 13-21. https://doi.org/10.22314/2073-7599-2025-19-1-13-21 EDN: IGIPGR

18. Калинин А.Б., Устроев А.А., Теплинский И.З., Мурзаев Е.А. Исследование приемов разуплотнения почвы в технологии возделывания картофеля // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2019. № 2 (99). С. 101-109. https://doi.org/10.24411/0131-5226-2019-10154

19. Устроев А.А., Калинин А.Б., Кудрявцев П.П. Исследование пропашного культиватора-глубокорыхлителя для обработки посадок картофеля в органическом земледелии // Техника и оборудование для села. 2018. № 6. С. 22-25. EDN: XQONQT

20. Брюханов А.Ю., Шалавина Е.В., Васильев Э.В., Обломкова Н.С. Показатели негативного воздействия на окружающую среду при производстве сельскохозяйственной продукции // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2019. № 2 (99). С. 250-260. https://doi.org/10.24411/0131-5226-2019-10170

21. Брюханов А.Ю., Кондратьев С.А., Обломкова Н.С., Оглуздин А.С., Субботин И.А. Методика определения биогенной нагрузки сельскохозяйственного производства на водные объекты // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2016. № 89. С. 175-183. EDN: XAGHJT

22. Новикова И.И., Бойкова И.В., Павлюшин В.А., Зейрук В.Н., Васильева С.В., Азизбекян Р.Р., Кузнецова Н.И. Перспективы использования биопрепаратов на основе микробов-антагонистов для защиты картофеля от болезней при хранении // Вестник защиты растений. 2013. № 4. С. 12-21. EDN: RXMEHB

REFERENCES

1. Mistratova N.A., Stupnitsky D.N., Yashin S.E. Organic farming in Russia (review article). Vestnik KrasGAU = Bulletin of KSAU. 2021;11 (176):100-107 (In Russ.) https://doi.org/10.36718/1819-4036-2021-11-100-107

2. Mikhaylushkin P.V., Alieva A.R. Organic agriculture - direction of transition to the “Green” economy in Russia. Mezhdunarodnyi sel'skokhozyaistvennyi zhurnal = International Agricultural Journal. 2020; 2: 17-19. (In Russ.) https://doi.org/10.24411/2587-6740-2020-12022

3. Lobachevsky Y.P. Scientific support of priority technologies of agro-industrial complex of the Russian Federation. Vestnik Rossiiskoi akademii nauk = Herald of the Russian Academy of Sciences. 2024; 94 (3): 275-282. (In Russ.) https://doi.org/10.31857/S0869587324030102

4. Bondarenko A.M., Kachanova L.S., Chelbin S.M. Development of the organic product market in providing technological sovereignty of the Russian Federation. Dal'nevostochnyi agrarnyi vestnik = Far Eastern Agricultural Journal. 2023;17(4):144-155. (In Russ.) https://doi.org/10.22450/1999-6837-2023-17-4-144-155

5. Lobachevsky Ya.P., Lachuga Yu.F., Izmailov A.Yu., Shogenov Yu.K. Scientific and technical achievements of agroengineering science in the context of digitalization of agriculture // Russian agricultural science. 2025;3:45-53. (In Russ.) https://doi.org/10.31857/S2500262725030081

6. Kondratieva O.V., Voityuk V.A., Slinko O.V., Polukhin A.A. The state and development trends of organic agriculture in the Russian Federation. Tekhnika i oborudovanie dlya sela = Machinery and Equipment for Rural Area 2025;5 (335):2-5. (In Russ.) https://doi.org/10.33267/2072-9642-2025-5-2-5

7. Voytyuk V.A., Kondratieva O.V., Slinko O.V. Organic agriculture in Russia: challenges and opportunities AgroEkoInzheneriya = AgroEcoEngineering. 2024;3 (120):19-32. (In Russ.) https://doi.org/10.24412/2713-2641-2024-3120-19-32

8. Chekha A.F. Organic products: key market trends. Nauka bez granits = Science without Borders. 2021;3 (55): 84-90. EDN: BWVJTZ

9. Starovoitov V.I., Starovoitova O.A., Manokhina A.A. Problems of organic farming in potato growing. In: Current Issues of Economics and Agribusiness. Coll. Articles IX Int. Sci. Prac. Conf. (Bryansk, 1-2 March 2018). Bryansk: Bryansk State Agrarian University. 2018: 404-411. (In Russ.) EDN: YALDOP

10. Starovoitova O.A., Starovoitov V.I., Manokhina A.A. Technology of application of fertilizers in growing organic potatoes. In: Innovative Technologies in Field and Ornamental Crop Production. Coll. of articles based on the materials of III All-Russ. (National) Sci. Prac. Conf. (Kurgan, 8 April 2019). Kurgan: Kurgan State University. 2019: 235-240. (In Russ.) EDN: MSCOCA

11. Loginov G.A., Stepanov A.N., Oreshin E.E., Zakharov A.M. Results of production tests of a machine for dry potato peeling. Technologies and technical means of mechanized production of crop and livestock products. 2012. No. 83. Pp. 47-52. (In Russ.) EDN: TFSFST

12. Oreshin E.E., Zakharov A.M. Efficiency of using a dry cleaning unit when preparing food potatoes for sale. Molochnokhozyaystvenny Vestnik. 2012. No. 4 (8). Pp. 45-51. (In Russ.) EDN: PULZFN

13. Smelik V.A., Dawoodzai M.A. Study of the working process of fermented organic fertilizer row (local) application machine. Agrarnyi vestnik Verkhnevolzh'ya = Agrarian Journal of Upper Volga Region. 2023;1(42):97-103. (In Russ.) EDN: ZZLKRC

14. Starovoitova O.A., Starovoitov V.I., Manokhina A.A. Effective weed control in organic farming. In: Scientific Innovations for Agricultural Production. Proc. Int. Sci. Prac. Conf. (Omsk, 21 February 2018). Omsk: Omsk State Agrarian University. 2018:402-411. (In Russ.) EDN: XMOLSH

15. Oreshin E.E., Stepanov A.N., Zakharov A.M. Improving the efficiency of dry potato peeling using brush rollers // Izvestia of the Saint Petersburg State Agrarian University. 2013. No. 31. Pp. 214-220. (In Russ.) EDN: SBYQZZ

16. Jabborov N.I., Zakharov A.M., Zykov A.V. Assessment of the effectiveness of using the aerodynamic method for pre- sale processing of potatoes // Technologies and technical means of mechanized production of crop and livestock products. 2018. No. 95. Pp. 136–143. (In Russ.) EDN: USSBTS

17. Zakharov A.M., Ustroev A.A., Murzaev E.A., Komoedov A.D. Methods for Designing Technologies of Organic Crop Production. Sel'skokhozyaistvennye mashiny i tekhnologii = Agricultural Machinery and Technologies. 2025;19(1):13-21. (In Russ.) https://doi.org/10.22314/2073-7599-2025-19-1-13-21 EDN: IGIPGR

18. Kalinin A.B., Ustroev A.A., Teplinsky I.Z., Murzaev E.A. Study of soil decompaction methods in potato cultivation technologies. Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produkcii rastenievodstva i zhivotnovodstva = Technologies, machines and equipment for mechanised crop and livestock production. 2019; 2 (99): 101-109. (In Russ.) https://doi.org/10.24411/0131-5226-2019-10154

19. Rastryaev A.A., Kalinin A.B., Kudryavtsev P.P. Investigation of a row cultivator for potato planting in organic farming. Tekhnika i oborudovanie dlya sela = Machinery and Equipment for Rural Area. 2018; 6: 22-25. (In Russ.) EDN: XQONQT

20. Briukhanov A.Yu., Shalavina E.V., Vasilev E.V., Oblomkova N.S. Indicators of negative environmental impact in agri-food production. Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produkcii rastenievodstva i zhivotnovodstva = Technologies, machines and equipment for mechanised crop and livestock production. 2019; 2 (99): 250-260. (In Russ.) https://doi.org/10.24411/0131-5226-2019-10170

21. Briukhanov A.Yu., Kondratiev S.A., Oblomkova N.S., Ogluzdin A.S., Subbotin I.A. Calculation method of agricultural nutrient load on water bodies. Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produkcii rastenievodstva i zhivotnovodstva = Technologies, machines and equipment for mechanised crop and livestock production.. 2016; 89: 175-183. (In Russ.) EDN: XAGHJT

22. Novikova I.I., Boikova I.V., Pavlyushin V.A., Zeyruk V.N., Vasilieva S.V., Azizbekyan R.R., Kuznetsova N.I. Application perspectives for biopreparations based on microbe-antagonists for potato disease control at storage. Vestnik zashchity rasteniy = Plant Protection News. 2013; 4: 12-21. (In Russ.) EDN: RXMEHB

Об авторе	**About the author**
Захаров Антон Михайлович, канд. техн. наук; ведущий научный сотрудник отдела агроэкологии в растениеводстве, Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», 196634, Россия, г. Санкт-Петербург, п. Тярлево, Фильтровское ш., д. 3 e-mail: zamsznii@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-3501-0543	**Anton M. Zakharov,** Cand. Sc. (Engineering), leading researcher, Department of Agroecology in Crop Production, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) – branch of FSAC VIM, 196634, Russia, Saint Petersburg, Tiarlevo, Filtrovskoje Shosse, 3) e-mail: zamsznii@yandex.ru ORCID: 0000-0003-3501-0543
Заявленный вклад автора А.М. Захаров – руководство исследованием,	**Author's contribution** A.M. Zakharov – research management,

концептуализация, создание проекта рукописи, редактирование, создание окончательной версии.	conceptualization, research management, conceptualization, drafting of the manuscript, editing, creation of the final version.
Конфликт интересов Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов	**Conflict of interest** The author declares no conflict of interest regarding the publication of this paper
Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи к публикации	The author has read and agreed to the published version of the manuscript.
Статья поступила в редакцию: 31.07.2026	**Received:** 31.07.2026
Одобрена после рецензирования: 02.09.2026	**Approved after reviewing:** 02.09.2026
Принята к публикации: 11.09.2026	**Accepted for publication:** 11.09.2026

Научная статья
УДК 631.3.631.2 DOI 10.24412/2713-2641-2026-3128-42-53

ИССЛЕДОВАНИЯ СЕМЕННЫХ СВОЙСТВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР ПРИ ХРАНЕНИИ В ПОЛИМЕРНЫХ РУКАВАХ

Алла Владимировна Новикова✉, Анастасия Николаевна Новикова, Лариса Владиславовна Кузнецова
Федеральный центр охраны здоровья животных (ВНИИЗЖ), г. Владимир, Российская Федерация
novikova-av@ARRIAH.RU; https://orcid.org/0000-0001-5992-8565

Аннотация. В условиях импортозамещения и повышения объемов производства растениеводческой продукции в аграрном секторе особую актуальность приобретают технологии полевого хранения зерновых масс в полимерных рукавах, имеющие низкую инвестиционную нагрузку на сельскохозяйственного производителя. Однако существующий способ полевого хранения имеет ряд существенных недостатков, что может сказаться на технологических свойствах зерна. Целью данного исследования являлось изучение влияния герметичных условий хранения в полимерных рукавах на зерно с дальнейшей оценкой его посевных качеств. Объекты исследования – *зернобобовые культуры: соя и горох урожая 2025 года.* Отбор проб осуществлялся на производственной площадке сельскохозяйственного производителя при закладке зерна на хранение и перед его выгрузкой из полимерного рукава. Забор точечных проб велся многоуровневым пробоотборником. Лабораторные исследования проводили в испытательных лабораториях ФГБУ ВНИИЗЖ. Исследованы исходные показатели зерна, способность прорастания гороха и сои соответствовали 99%. После семи месяцев хранения в полевых условиях наблюдалось снижение способности прорастания, которая составила 96% в горохе и 86% в семенах сои, что коррелирует с показателем «всхожесть семян» в горохе 95%, а в сое идет снижение до 75%. Установлено, что 14 % семян сои полностью потеряли способности прорастания, а 5 % – ненормально проросшие семена, имеющие нарушения в развитии проростка – неправильное развитие корешков семян сои (спирально закрученные). Герметичные условия хранения в полимерных рукавах не повлияли на семенные качества зерна гороха. Хранение семенного материала зерна сои в таких же условиях имеет высокий риск снижения посевных качеств (всхожесть) до 25%.

Ключевые слова: зернобобовые, семенной материал, свежеубранное зерно, нестационарный способ хранения, полимерный рукав, всхожесть, способность прорастания.

Для цитирования: Новикова А. В., Новикова А. Н., Кузнецова Л. В. Исследования семенных свойств сельскохозяйственных культур при хранении в полимерных рукавах // АгроЭкоИнженерия. 2026. №.3(128) С.42-54 https://doi.org/ 10.24412/2713-2641-2026-3128-42-53

Благодарности: Исследование выполнено в рамках комплексного исследовательского проекта, направленного на разработку технологии герметичного хранения сельскохозяйственных культур с разным биохимическим составом в полевых условиях, и применимой для различных климатических условий Российской Федерации. Отдельная благодарность сельскохозяйственному производителю ООО «Терра Де Люкс» за предоставленную площадку для научно-практических исследований.

Research article
Universal Decimal Code 631.3.631.2

INVESTIGATION INTO CROP SEED VIABILITY WHEN STORED IN POLYMER BAGS

Alla V. Novikova✉, Anastasia N. Novikova, Larisa V. Kuznetsova

Federal Center for Animal Health (ARRIAH), Vladimir, Russia
novikova-av@ARRIAH.RU; https://orcid.org/0000-0001-5992-8565

Abstract. In the context of import substitution and increased domestic crop production, field storage technologies for grain in polymer bags are becoming particularly important. They eliminate the need for post-harvest grain treatment and allow the grain to be transferred directly from the combine harvester into polymer bags for field storage. Thereby, they offer low investment burden on agricultural producers. However, the existing field storage method has a number of significant drawbacks that can affect the technological quality of grain. The aim of this study was to investigate the effect of storage in hermetically sealed polymer bags on grain and further evaluate its sowing qualities. The study object was leguminous crops (soybeans and peas) harvested in 2025. Grain samples were collected with a multi-level sampler at the agricultural producer's site before sealing and immediately after unpacking the polymer storage bags. Laboratory analyses were conducted in the testing laboratories of ARRIAH. Initial germination capacity of peas and soybeans was 99%. After seven months of field storage, a decrease in seed germination capacity was observed. It was 96% in peas and 86% in soybean seeds. This correlated with the seed germination rate of 95% in peas, while in soybeans there was a decrease to 75%. Furthermore, 14% of soybean seeds showed a complete loss of viability, and 5% developed into abnormal seedlings as their roots were spirally twisted. Temporary field storage in hermetic polymer bags did not affect the seed quality of pea grain. Similar storage of soybean seeds carries a high risk of up to 25% lower field emergence.

Key words: pulse crops, seed material, freshly harvested grain, non-permanent storage in polymer bags, germination rate, germination capacity

For citation: Novikova A. V., Novikova A. N., Kuznetsova L. V. Investigation into crop seed viability when stored in polymer bags. AgroEcoEngineering. 2026;3(128):42-54 (In Russ.) https://doi.org/10.24412/2713-2641-2026-3128-42-53

Acknowledgments: This study was conducted as part of a comprehensive research project aimed at developing a hermetic storage technology for agricultural crops with different biochemical compositions under field conditions, applicable to the various climates of the Russian Federation. The authors express their gratitude to Terra De Luxe Company for providing the experimental site for this applied research.

Введение. Масштабы развития агропромышленного комплекса Российской Федерации идут по всем направлениям отраслей, в первую очередь это ежегодное увеличение валового сбора продукции растениеводства, особенно импорта ориентированной (пшеница, соя, лен и др.). В данной ситуации ресурсом является расширение сельскохозяйственных угодий (ввод в структуру земельного оборота почвы, прошедшие процедуру раскисления), а также интентисификации по средствам агрохимии [1, 2]. Несмотря на это, расширение возможностей существующего зернокомплекса РФ идет не так интенсивно, что сказывается на качестве хранения как товарной продукции, так и семенного материала. Так из-за сложившегося дефицита складов напольного хранения [3], размещение

собранного урожая осуществляют как на крытых токах (рис.1, б), так и в складах по принципу секторного хранения (рис.1, а), которое может привести к смешиванию сельскохозяйственных культур и нарушению сортовой чистоты.

На рисунке 1 показано хранение товарной продукции зерна, где идет несоблюдение товарного соседства по сельскохозяйственным культурам (б). Технические культуры длительное время могут находиться на току, сроки данного хранения длятся от нескольких недель до нескольких месяцев, такая необходимость обусловлена либо отсутствием свободного стационарного склада, либо ожиданием послеуборочной обработки зерна, что может влиять на влажность зерна, поскольку зерно гигроскопично и очень чувствительно к относительной влажности окружающей среды[12].



а) б)

Рис. 1. Зональное хранение семенного материала в складах напольного хранения и собранного урожая на производственных площадках аграриев России, урожай 2023 г. (фото автора)

а) зональное хранение семян пшеницы по репродукциям; б) не товарное соседство при хранении семян масленичных культур (соя и подсолнечник)

Fig. 1. Zonal storage of seeds in floor storages at the production sites of Russian farmers, the 2023 harvest (photo by the author)

a) zonal storage of wheat seeds by generation; b) incompatible storage of oilseed crops (soybeans and sunflowers)

Помимо этого, сельскохозяйственные производители сталкиваются с проблемой отсутствия личных механизированных средств (зерноочистительные комплексы (ЗАВы), зерносушилки и другие установки), необходимых для очистки и сушки свежеубранного зерна [4, 5], либо наличие их, но низкой пропускной способности [6]. В данных ситуациях аграрии используют мобильные установки сельскохозяйственной техники и оборудуют склады напольного хранения приспособлениями, которые позволяют снизить влажность зерна и его массовую долю влаги [7], но этого недостаточно для организации поточной работы со свежеубранным зерном.

В связи со сложившимися обстоятельствами сельскохозяйственные производители вынуждены закладывать зерно на хранение с условно базисными показателями по сору и влажности (отклонения ±2%), что существенно влияет на изменения количественно-качественных показателей зерна любой категории (кормовые, пищевые и семенные) [8, 9] и только герметичные условия хранения могут снизить возможные потери путем

[12]Анискин В. И. Решение проблемы совершенствования послеуборочной обработки и хранения семян зерновых культур // Селекция и семеноводство. 1983. № 7. С. 2-8.

самоконсервирования зерна[13]. Особое место в технологиях занимает хранение-консервирование зерна во влажном состоянии. Такая технология рекомендуется для хранения кормового зерна всех культур, но наиболее эффективна она на кукурузе. [10].

В связи с этим внедрение новых способов хранения растениеводческой продукции (зерно и зерновой шрот) в герметичных полимерных рукавах (ПР) получило широкое распространение, где допустимо хранение с повышенной влажностью [11, 12]. Основной срок хранения отмечается в 6-10 месяцев как наиболее безопасный для показателей качества [11, 13]. Однако учеными отмечается, что при хранении зерна с влажностью выше 14% (злаковые сельскохозяйственные культуры) возможно снижение всхожести и ухудшение качества для условий с высоким содержанием CO_2[14].

На сегодняшний день российские аграрии активно применяют данный способ хранения товарной зерновой продукции любого назначения [5, 13, 15]. Стоит отметить, что семенной материал хранят в большей степени в стационарных зернохранилища и в меньшей в нестационарных условиях – хранение в полимерных рукавах. Несмотря на это присутствует дефицит стационарных мест хранения зерна, поскольку для организации полевого хранения зерна необходима специализированная сельскохозяйственная техника [16], что выражается в практическом хранении зерна на крытых токах и открытых площадках.

Ученые ведут поиски по альтернативным способам хранения растениеводческой продукции [15, 17], в основном все они базируются на емкостях, которые обеспечивают герметичность, возможность осуществлять термометрический контроль, а также вести активное вентилирование, что требует капитальных сооружений и инвестиций, данные проекты имеют длительный период реализации [5, 15].

В целях сбережения зерна российские аграрии используют способ хранения своей растениеводческой продукции в полимерных рукавах (рис. 2.), который основан исключительно на герметичном хранении, но исключает возможность вести термометрию, однако на практике установлено, что герметичность ПР часто нарушается [6, 18], что имеет нежелательные последствия для хранящейся товарной продукции.



Рис. 2. Хранения семян в полевых условиях, урожай 2025 г. (фото автора)

Fig. 2. Seed storage in the field, the 2025 harvest (photo by the author)

В научной литературе описаны научно-практические работы по изучению влияния герметичных условий хранения больших масс зерна продовольственной и кормовой

[13] Трисвятский Л.А. Хранение зерна. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.

категории и даже семян, которое протекало в полимерных рукавах в полевых условиях[14] [10, 11, 13]. В практической деятельности сельскохозяйственные производители хранят в ПР большие объемы товарного зерна всех категорий назначения, в том числе и семенной материал, а научные исследования по влиянию герметичных условий хранения на семенные качества товарной продукции проведены только на семенах пшеницы и кукурузы [10, 11]. В свою очередь хранение зернобобовых культур семенной категории в полимерных рукавах широко распространено, хотя бобовые культуры относятся к хрупкому сырью[15] и сохранить их технологические и посевные качества непросто, а в условиях нестационарного хранения в ПР они еще не изучены. Поэтому изучение посевных качеств зерна зернобобовых культур после длительного хранения в полимерных рукавах позволит оценить возможные потери при использовании данного способа в агротехнологии агропромышленного комплекса.

Цель работы – изучение влияния герметичных условий хранения в полимерных рукавах на зерно с дальнейшей оценкой его посевных качеств. Полученные результаты позволят аграриям осуществлять планирование производственных работ на основании научно-практического опыта, зная посевные качества семян после длительного хранения в нестационарных условиях посредством полимерных рукавов.

Материалы и методы исследований. В качестве объекта исследований были взяты семена гороха (сорт Бельмондо) и сои (сорт Скульптор), урожая 2025 г. Уборка данных культур проводилась прямым комбайнированием. Горох обмолачивали 03.08.2025 г., его влажность на момент уборки составляла 15,2 %. Сою убирали 23.09.2025 г. с влажностью 15,3 %. Технология послеуборочной обработки заключалась в очистке зерна на ЗАВе, после чего влажность снизилась до 15,0 % (горох). Зерно сои после очистки от сорной примеси сразу направили в зерносушилку «Башенная зерносушилка GSI», после чего влажность сои снизилась до 14,0 %. Сорная примесь в анализируемых партиях не превышала 0,5 %. Отбор проб для определения показателей качества зерна осуществлялся после всех технологических процессов обработки зерна, его показатели соответствовали стандарту[16] по всхожести (табл. 1).

Закладка на хранение проводилась в сентябре 2025 года: горох 01.09.2025 г.; соя 27.09.2025 г. после послеуборочного дозревания. Объемы хранения: соя в количестве 180280 кг (полимерный рукав № 13 – это условный склад); горох в количестве 195760 кг (полимерный рукав № 1 – это условный склад).

Лабораторные испытания проводились по показателям «всхожесть семян[17]» и «способность прорастания», поскольку эти показатели одни из наиболее важных при оценке семян и позволяют сделать прогноз по будущему урожаю. Для определения всхожести семян руководствовались ГОСТ 12038-84 «Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести», а для определения способности прорастания ГОСТ 10968-88 «Зерно. Методы определения энергии прорастания и способности прорастания».

---

[14] Титенок Л. Н., Ткаченко М. И., Кулинцев В. В. Хранение зерна пшеницы и кормов в полиэтиленовых контейнерах: практическое руководство / под ред. Л. Н. Титенка. Ставрополь: Сервисшкола. 2009. 66 с.

[15] Николаева М. Г. Покой семян. Физиология семян. М.: Наука. 1982. С. 125-183.

[16] ГОСТ 10246-86 «Семена гороха. Сортовые и посевные качества. Технические условия» [Электронный ресурс] URL: https://meganorm.ru/Index2/1/4294840/4294840415.htm (дата обращения 06.06.2026)

[17] Всхожесть — это способность семян прорастать, давая нормально развитые ростки в установленные сроки

Проращивание велось в воронках (рис. 3), а всхожесть – на рулонах (рис. 4). На начальном этапе роста растений семян сои проводили методом проращивания в рулонах при переменной температуре 20-30ºС, в темноте по ГОСТ 12038-84, учитывая морфометрические показатели проростков на различных периодах проращивания.

При подсчете энергии прорастания считали и удаляли нормально проросшие семена, а загнившие, не проросшие и ненормально проросшие семена считали отдельно, как непригодные. Вычисляли процент всхожести семян по каждой пробе, устанавливая достоверность результатов анализа проб семян по допустимой норме отклонения в параллельной повторности.

Для проращивания семян в лабораторных условиях следили за микроклиматом помещения; температура не превышала 22 ˚С, которая контролировалась гигрометром психрометриическим.

Результаты исследования. Условия полевого хранения чувствительны к температуре окружающей среды, которая полностью передавалась зерновой массе. Диапазон температуры прослеживался от +15 °С до -20 °С по региону проведения исследований (Тамбовская область, Моршанский район, РФ)[18] в период с сентября 2025 г. по март 2026 г.

Экспериментальные данные показали, что семена гороха более стойкие при хранении в полевых условиях, что выражается в дружном прорастании уже на 3 день подсчета результатов (предварительно), энергия прорастания 90%; способность прорастания 96%. У сои наблюдался замедленный рост – энергия на 3 сутки 80%; способность прорастания 86%.



а) б)

Рис. 3. Процесс прорастания семян на третий день анализа
а) семена сои; б) семена гороха
Fig. 3. Seed germination process on Day 3 of analysis
a) soybean seeds; b) pea seeds

[18] Погода в Моршанском районе. [Электронный ресурс] URL: http://rp5.co.za/Погода_в_Моршанском_районе (дата обращения 06.06.2026)

На рисунке 3 можно наблюдать активность процессов начальных ростовых отростков на 3-е сутки испытаний, которые имеют отличия по культурам – если в семенах гороха (б) наблюдается высокая активность, то в семенах сои (а) рост только начинается. Анализ энергии прорастания имеет высокую практическую значимость для агрономов, результат которой, позволяет оценить насколько быстро и дружно будут всходы в поле, без учета климатических условий конкретного региона возделывания.



Рис. 4. Оценка ростовых характеристик для определения всхожести
а) семена сои; б) семена гороха
Fig. 4. Evaluation of growth characteristics to determine germination
a) soybean seeds; b) pea seeds

Энергичные обменные процессы у семян растений активизировались вскоре после помещения их в условия, благоприятные для роста и развития. В результате инициируется рост проростков (рис. 4), где у сои он протекает более медленно и неоднородно (а), по сравнению с горохом, где все зерна имеют одинаковую интенсивность роста (б). Семена сои имели особенности прорастания, которые заключались в появлении неправильно проросших семенах (5%) (рис. 5), что не наблюдалось в зернах гороха. Качество прорастания семян имеет значение в растениеводстве, так как от дружности всходов зависит успех всех остальных полевых работ.



Рис. 5. Физические показатели семян сои после активации зародыша
Fig. 5. Physical properties of soybean seeds after embryo activation

В семенах сои наблюдались неправильно проросшие семена, которые выражались в закручивании корешка (рис. 5). Спирально закрученные ростки были выявлены только у

семян сои. Мы связываем это с генетическими особенностями конкретного сорта либо с патогенной болезнью семян. Необходимо учитывать, что большинство вирусов могут влиять и на семенной материал, что сказывается на морфометрических показателях семян. Соя очень подвержена различным вирусам, которые являются высоко патогенными и способны сохранять жизнеспособность не только в растениях, но и в семенах [19].

Итоговый подсчет результатов проводился на 7-е сутки исследований, результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты лабораторных исследований в динамике посевных качеств зерна гороха и сои

Table 1. Results of laboratory studies into the dynamics of sowing qualities of pea and soybean grains

Исследуемый материал	Показатели качества		Комментарии
	Способность прорастания, % по ГОСТ 10968-88	Всхожесть, % по ГОСТ 12038-84	
Исходные данные			
Семена сои	99	95	Неправильно проросшие семена
Семена гороха	99	99	-
После хранения			
Семена сои	86	75	Неправильно проросшие семян
Семена гороха	96	95	-

Обсуждение. При оценке посевных качеств семян сои по всхожести, анализируемая партия имеет результаты категории семян ниже репродукционных семян для товарных целей, что исключает соответствие техническим условиям ГОСТ 52325-2005 «Семена сельскохозяйственных растений. Сортовые и посевные качества. Общие технические условия». Следовательно, данный посевной материал не соответствует качеству, предъявляемому к семенам. Потеря способности прорастания семян сои 14%, что свидетельствует о значительных биологических изменениях, которые можно связать с процессами хранения при нестационарных условиях, а также генетическими особенностями семян.

Всхожесть гороха после длительного хранения (7 месяцев) 95%, что соответствует норме I класса семян гороха по ГОСТ 10246-86 «Семена гороха. Сортовые и посевные качества. Технические условия».

Выводы. Учитывая существующий дефицит зернохранилищ, использование нестационарного способа хранения зерна в полимерных рукавах может быть применено как альтернатива стационарному хранению – складам напольного хранения и силосным корпусам. Герметичное хранения з*ернобобовых культур имеет свои особенности. Так зерно*

гороха не чувствительно к данным условиям и сохраняет всхожесть до максимального уровня. Зерно сои меняет свои показатели всхожести до потери семенных свойств по всхожести до 25%.

Полученные результаты исследования могут быть использованы аграриями в выборе способа хранения семенного материала зернобобовых культур.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Аварский Н.Д., Таран В.В., Гасанова Х.Н. Актуальные вопросы материально-технического обеспечения агропродовольственного сектора России // Экономика, труд, управление в сельском хозяйстве. 2024. № 3(109). С. 96-108. https://doi.org/10.33938/243-96

2. Борисова Т.Ю., Шамин А.Е. Воспроизводство и использование земель сельскохозяйственного назначения на региональном уровне // Вестник НГИЭИ. 2023. № 11(150). С. 77-89. https://doi.org/10.24412/2227-9407-2023-11-77-89

3. Фейденгольд, В.Ф. Потребность России в зернохранилищах. Экспертная оценка // Комбикорма. 2019. № 6. С. 30-34. https://doi.org/10.25741/2413-287X-2019-06-2-071

4. Фейденгольд, В.Б., Урлапова И.Б Техника и технологии по хранению зерна. Бизнес-конференция «Зернохранилища России 2022» // Хлебопродукты. 2022. № 4. С. 18-21. EDN: FFBWFF

5. Бахарев, Г.Ф., Дролова Л.И., Синицын В.А. Оценка вариантов технологий механизированного хранения зерна в Сибири // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2019. № 6 (176). С. 138-142. EDN: NVFGBZ

6. Новикова А. В. Полевое хранение зерна кукурузы в полиэтиленовых конструкциях // Аграрный научный журнал. 2025. №3. С.129-135. https://doi.org/10.28983/asj.y2025i3pp129-135

7. Новикова, А.В. Технические способы доработки зерна гороха в производственных условиях сельскохозяйственного производителя // Аграрный научный журнал. 2025. № 1. С. 112-119. https://doi.org/10.28983/asj.y2025i1pp112-119

8. Максимова Е. Дефицит или недозагрузка // Агроинвестор. 2022. № 11. С. 21-29.

9. Герасимов, Е.Ю. Завиваев С.Н., Кучин Н.Н. Теоретические аспекты консервирования фуражного зерна повышенной влажности // Вестник НГИЭИ. 2014. № 8 (39). С. 19-26. EDN: SNRHYZ

10. Кирпа Н.Я. Научные принципы и промышленные технологии хранения зерновых масс // Зерновые продукты и комбикорма. 2013. № 51 (3). С. 11-16. EDN: WKPGTR

11. Титенок Л.Н. Ткаченко М. Слюсарев Р.А. Инновационная технология хранения зерна и семян озимой пшеницы в полиэтиленовых контейнерах // Зерновое хозяйство. 2007. № 7. С. 21-24. EDN: IJAOGH

12. Idler C., Wagner A., Weber U., Hoffmann T. Effect of short-term storage on quality of wheat stored in large polyethylene bags // Agricultural Engineering International: the CIGR e-journal. 2012. Vol. 14 (1). P. 149-156. URL: https://www.researchgate.net/publication/277192696_Effect_of_short-term_storage_on_quality_of_wheat_stored_in_large_polyethylene_bags

13. Марьин В.А., Верещагин А.Л., Бычин Н.В. Опыт хранения зерна гречихи в рукавах // Хлебопродукты. 2025. № 5. С. 35-40. EDN: LLXWYA

14. Samyuktha S. S., Vishnu M., Raveena R., Raghul S. Temporary grain storage: Insights into CAP structures and polyethylene bag silos // Agri Magazine. 2025. Vol. 02(12). P. 111-113. https://agrimagazine.in/wp-content/uploads/2025/12/E-AGM-02-12-33-111-113.pdf

15. Новиков М.А., Алдохина Н.П, Павлов С.Б., Антонова Н.Э. Альтернативная технология хранения зерна в условиях Новгородской области // Аграрный вестник Верхневолжья. 2025. № 3 (53). С. 150-156. EDN: KYCSFU

16. Хуссейн, И.А.Х, Левшин. А.Г., Гаспарян И.Н. Повышение эффективности механизированной уборки пшеницы в условиях Ирака с применением полиэтиленовых рукавов // Агроинженерия. 2025. № 27(6). С. 27-34. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-27-34

17. Ганущенко О., Зенькова Н. Особенности заготовки травяных кормов в полимерной упаковке // Ветеринарное дело (Минск). 2025. № 6. С. 36-42. EDN: FJMPNJ

18. Новикова А.В. Причины несанкционированной разгерметизации полиэтиленовых рукавов при полевом хранении растениеводческой продукции // Health, Food & Biotechnology. 2025 № 7(3). С. 50-62. https://doi.org/10.36107/hfb.2025.i3.s279

19. Башкирова И.Г., Шнейдер Ю.А., Каримова Е.В. Потенциально опасные вирусы сои // Защита и карантин растений. 2024. №6. С.32-34. https://doi.org/10.47528/1026_8634_2024_6_32

REFERENCES

1. Avarskii N.D., Taran V.V., Gasanova H.N. Current issues of material and technical supporting the agri-food sector in Russia. Ekonomika, trud, upravlenie v sel'skom khozyaistve = Economics, Labor, Management in Agriculture. 2024;3 (109): 96-108. (In Russ.) https://doi.org/10.33938/243-96

2. Borisova, T.Yu., Shamin A.E. Reproduction and use of agricultural land at the regional level. Vestnik NGIEI = Bulletin of Nizhny Novgorod State Engineering and Economic University. 2023;11 (150):77-89. (In Russ.) https://doi.org/10.24412/2227-9407-2023-11-77-89

3. Feydengold V. B. Russia's need for grain storage facilities: Expert's assessment. Kombikorma = Complete Feed. 2019;6:30-34. (In Russ.) https://doi.org/10.25741/2413-287X-2019-06-2-071

4. Feydengold V.B., Urlapova I.B. Machinery and technologies for grain storage: "Grain Storage Facilities of Russia – 2022" Business Conference. Khleboprodukty = Bread Products. 2022;4:18-21. (In Russ.) EDN FFBVFF

5. Bakharev G.F., Drolova L.I., Sinitsyn V.A. The evaluation of alternative technologies of mechanized grain storage in Siberia. Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Bulletin of Altai State Agricultural University. 2019;6 (176).:138-142. (In Russ.) EDN: NVFGBZ

6. Novikova A.V. Methods of long-term storage of corn grain in polyethylene structures. Agrarnyi nauchnyi zhurnal = The Agrarian Scientific Journal. 2025;3:129-135. (In Russ.) https://doi.org/10.28983/asj.y2025i3pp129-135

7. Novikova, A.V. Technical methods of post-harvesting pea grain in the production conditions of an agricultural producer. Agrarnyi nauchnyi zhurnal = The Agrarian Scientific Journal. 2025;1: 112-119. (In Russ.) https://doi.org/10.28983/asj.y2025i1pp112-119

8. Maksimova E. Shortage or Underutilization. Agroinvestor = Agri-business Investor. 2022;11:21-29. (In Russ.)

9. Gerasimov E. Yu. Zavivaev S.N., Kuchin N.N. Theoretical aspects conservations of fodder grain the raised humidity. Vestnik NGIEI = Bulletin of Nizhny Novgorod State Engineering and Economic University 2014;8 (39):19-26. (In Russ.) EDN: SNRHYZ

10. Kirpa N.Ya. Scientific principles and industrial technologies for storing grain masses. Zernovye produkty i kombikorma = Grain Products and Mixed Fodders. 2013;51 (3): 11-16. EDN: WKPGTR

11. Titenok L. N., Tkachenko M., Slyusarev R. A. Innovative technology for storing grain and seeds of winter wheat in polyethylene containers. Zernovoe khozyaistvo = Grain Farming. 2007;7: 21-24. (In Russ.) EDN: IJAOGH

12. Idler C., Wagner A., Weber U., Hoffmann T. Effect of short-term storage on quality of wheat stored in large polyethylene bags // Agricultural Engineering International: the CIGR e-journal. 2012. Vol. 14 (1). P. 149-156. (In Eng.) URL: https://www.researchgate.net/publication/277192696_Effect_of_short-term_storage_on_quality_of_wheat_stored_in_large_polyethylene_bags

13. Maryin V.A., Vereshchagin A.L., Bychin N.V. Experience of buckwheat grain storage in bags. Khleboprodukty = Bread Products. 2025; 5:35-40. (In Russ.) EDN: LLXWYA

14. Samyuktha S. S., Vishnu M., Raveena R., Raghul S. Temporary grain storage: Insights into CAP structures and polyethylene bag silos. Agri Magazine. 2025; 02(12): 111-113. (In Eng.) https://agrimagazine.in/wp-content/uploads/2025/12/E-AGM-02-12-33-111-113.pdf

15. Novikov M.A., Aldokhina N.P., Pavlov S.B., Antonova N.E. Alternative technology of grain storage in the Novgorod Region Agrarnyi vestnik Verkhnevolzh'ya = Agrarian Journal of Upper Volga Region. 2025;3 (53):150-156. (In Russ.) EDN: KYCSFU

16. Hussein I. A. Kh., Levshin A.G., Gasparyan I.N. Improving the efficiency of mechanized wheat harvesting in Iraq using polyethylene hoses. Agroinzheneriya = Agricultural Engineering (Moscow). 2025;27(6):27-34.(In Russ.) https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-27-34

17. Ganushchenko O., Zenkova N. Specifics of preparing grass-based feeds in polymer packaging Veterinarnoe Delo (Minsk) = Veterinary Practice (Minsk). 2025;6:36-42.(In Russ.) EDN: FJMPNJ

18. Novikova A.V. Causes of unauthorized depressurization of polyethylene sleeves during field storage of plant products. Health, Food & Biotechnology. 2025;7(3):50-62. (In Russ.) https://doi.org/10.36107/hfb.2025.i3.s279

19. Bashkirova I.G., Shneyder Yu.A., Karimova E.V. Potentially damaging viruses of soybean. Zashchita i karantin rastenii = Plant Protection and Quarantine. 2024;6: 32-34. (In Russ.) https://doi.org/10.47528/1026_8634_2024_6_32

Об авторах	**About the authors**
Новикова Алла Владимировна канд. с.-х. наук, младший научный сотрудник химико-токсикологического отдела Испытательной центральной научно методической ветеринарной лаборатории (ИЦНМВЛ) ФГБУ «ВНИИЗЖ» (филиал ФГБУ «ВНИИЗЖ») ул. Оранжерейная, д. 23, стр. 2, г. Москва,	**Alla V. Novikova** Candidate of Agricultural Sciences, junior researcher, Chemical Toxicology Department, Research Center for Scientific and Medical Research of Veterinary Medicine, Federal Center for Animal Health ARRIAH (branch of SBI ARRIAH) Oranzhereynaya Str., 23, Bldg. 2, Moscow,

111 622, Россия novikova-av@ARRIAH.RU https://orcid.org/0000-0001-5992-8565	111 622, Russia Email: novikova-av@ARRIAH.RU https://orcid.org/0000-0001-5992-8565
Новикова Анастасия Николаевна Эксперт Тульского филиала ФГБУ «ВНИИЗЖ» ул. Некрасова, д. 1-а, г. Тула, 300045, Россия Email: a–novikova@mail.ru https://orcid.org/0009-0003-2941-9497	**Anastasia N. Novikova** Expert at the Tula Branch of the Federal State Budgetary Institution "ARRIAH" Nekrasova Str., 1-a, Tula, 300045, Russia Email: a--novikova@mail.ru https://orcid.org/0009-0003-2941-9497
Кузнецова Лариса Владиславовна заведующий отделом качества зерна и продуктов его переработки Тульской испытательной лаборатории (ТИЛ) ФГБУ «ВНИИЗЖ» (филиал ФГБУ «ВНИИЗЖ») ул. Некрасова, д. 1-а, г. Тула, 300045, Россия Email: kuznetsova@arriah.ru	**Larisa V. Kuznetsova** Head of the Department of Grain and Grain Processing Products Quality, Tula Testing Laboratory (TIL) FSBI "ARRIAH" (branch of SBI ARRIAH) Nekrasova Str., 1-a, Tula, 300045, Russia Email: kuznetsova@arriah.ru
Заявленный вклад авторов **Новикова А.В.** Разработка концепции, формирование цели, научное руководство, разработка методологии, написание рукописи, проведение полевых наблюдений и лабораторных исследований; отбор проб. **Новикова А.Н.** разработка методологии, курирование данных, валидация результатов. **Кузнецова Л.В.** лабораторные выполнения исследований, проверка воспроизводимости результатов.	**Authors' contribution:** **Novikova A.V.** Conceptualization, objective formulation, scientific supervision, methodology development, manuscript writing, field observations and laboratory tests, sampling **Novikova A.N.** Methodology development, data curation, result validation **Kuznetsova L.V.** Laboratory research, verification of result reproducibility
Конфликт интересов Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов	**Conflict of interest** The authors declare that there is no conflict of interest
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи к публикации.	The authors have read and approved the final version of the manuscript for publication.
Статья поступила в редакцию: 20.06.2026	**Received:** 20.06.2026
Одобрена после рецензирования: 20.08.2026	**Approved after reviewing:** 20.08.2026
Принята к публикации: 11.09.2026	**Accepted for publication:** 11.09.2026

Научная статья
УДК 631.31-35+62.566 DOI 10.24412/2713-2641-2026-3128-54-70

ОЦЕНКА СПОСОБА ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ДВИЖЕНИЯ МАШИННО-ТРАКТОРНОГО АГРЕГАТА С АСИММЕТРИЧНОЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ МАШИНОЙ

Татьяна Вениаминовна Вихрова[1], Рузана Хазретовна Датхужева[2], Геннадий Михайлович Виздрик[3], Олег Геннадьевич Огнев[4], Юрий Николаевич Строганов[5]

[1-4] Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, Санкт-Петербург, Россия
[5] Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия
[1] tv1948v@yandex.ru
[2] ruzana_h@list.ru
[3] gennadiy.w@googlemail.com
[4] ognew.og@mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-0843-7597
[5] yurij.stroganov@mail.ru, https://orcid.org/0009-0007-4203-6748

Аннотация. Для устойчивой работы машинно-тракторного агрегата (МТА) с прицепной асимметричной сельскохозяйственной машиной (АСХМ) необходимо обеспечить строгую прямолинейность его перемещения, нарушение которой приведет к нарушению агротехнических требований к технологическим операциям в растениеводстве. Неоднократные попытки повысить стабильность движения АСХМ относительно продольной оси движения трактора посредством применения разнообразных уравновешивающих механизмов и устройств, а также поперечного смещения точки крепления АСХМ к трактору не позволили решить данную проблему, которая остается весьма актуальной. В работе моделируется процесс обеспечения устойчивости движения МТА с АСХМ на основе предложенного авторами метода применения на агрегатируемой машине колес разного диаметра, кинематически связанных друг с другом. Причем левое колесо может подтормаживаться относительно правого (большего диаметра), за счет чего обеспечивается их различная скорость движения, что и создает дополнительная стабилизирующая сила на правом колесе, образующая стабилизирующий момент, направленный противоположно (компенсирующий) исходному отклоняющему моменту. Целью исследования является оценка способа обеспечения устойчивости движения машинно-тракторного агрегата с ассиметричной сельскохозяйственной машиной. Результаты моделирования процесса движения МТА с АСХМ, в зависимости от ряда технических и технологических параметров (скорость движения, ширина захвата, масса, габаритные размеры и пр.) подтвердили работоспособность предложенного способа стабилизации. Формирование разворачивающей силы на правом колесе АСХМ стабилизирует ее движение относительно продольной оси трактора. Дополнительное тяговое усилие, потребное для создания стабилизирующей силы, составляет 8-20 % от тягового усилия трактора. Наиболее сильное влияние на величину стабилизирующей силы оказывают ширина захвата АСХМ, удельная нагрузка на нее, диаметры и соотношение диметров левого и правого колес АСХМ.

Ключевые слова: машинно-тракторный агрегат, сельскохозяйственная асимметричная прицепная машина, устойчивость движения, моделирование, стабилизация.

Для цитирования: Вихрова Т.В., Датхужева Р.Х., Виздрик Г.М., Огнев О.Г., Строганов Ю.Н. Оценка способа обеспечения устойчивости движения машинно-тракторного агрегата с асимметричной сельскохозяйственной машиной // АгроЭкоИнженерия. 2026. 2026. № 3(128). С. 54-71 https://doi.org/10.24412/2713-2641-2026-3128-54-70

Research article
Universal Decimal Code 631.31-35+62.566

EVALUATION OF A MOVEMENT STABILITY CONTROL METHOD FOR TRACTOR-IMPLEMENT UNITS WITH ASYMMETRIC AGRICULTURAL MACHINES

Tatiana V. Vikhrova[1], Ruzana Kh. Datkhuzheva[2], Gennady M. Vizdrik[3], Oleg G. Ognev[4]✉, Yuri N. Stroganov[5]

[1-4] Saint Petersburg State Agrarian University, Saint Petersburg, Russia

[5] Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

[1] tv1948v@yandex.ru

[2] ruzana_h@list.ru

[3] gennadiy.w@googlemail.com

[4] ognew.og@mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-0843-7597

[5] yurij.stroganov@mail.ru, https://orcid.org/0009-0007-4203-6748

Abstract. Stable operation of a tractor unit with an asymmetric trailed agricultural machine requires that the unit move in a perfectly straight line. Otherwise, agrotechnical requirements for crop production operations will be violated. There were repeated attempts to improve the movement stability of an asymmetric machine relative to the tractor's longitudinal axis of travel using various balancing mechanisms and devices. Another option was the lateral displacement of the machine's hitch point. Yet these approaches have not solved the problem, and it is still very important. The authors proposed a method to use the wheels of different diameters, kinematically linked on the trailed machine. Specifically, the left wheel could slow down slightly relative to the right wheel with larger diameter. This would result in different speed of their movement and generate an additional stabilizing force on the right wheel, creating a stabilizing moment that opposes and compensates for the initial deflecting moment. The objective of this study was to evaluate the viability of the proposed method by simulating the movement of a tractor with an asymmetric trailed agricultural machine with various technical and operational parameters including travel speed, working width, mass, dimensions, and others. Simulation results confirm the effectiveness of the proposed stabilization method. The turning force on the right wheel of the machine stabilized its movement relative to the tractor's longitudinal axis. The additional tractive effort required to create a stabilizing force accounted 8-20% of the total tractor's tractive effort. Furthermore, the working width of the machine, the specific load on it, the diameters and the diameter ratio of its left and right wheels have the greatest effect on the magnitude of the stabilizing force.

***Keywords**:* machine tractor unit, asymmetric trailed agricultural machine, motion stability, simulation, stabilization.

***For citation**:* Vikhrova T.V., Datkhuzheva R.H., Vizdrick G.M., Ognev O.G., Stroganov Yu.N. Evaluation of a movement stability control method for tractor-implement units with

asymmetric agricultural machines. AgroEcoEngineering. 2026;3(128): 54-71 (In Russ.) https://doi.org/10.24412/2713-2641-2026-3128-54-70

Введение. При механизации полевых работ в АПК широко применяются разнообразные сельскохозяйственные машины и орудия [1]. Значительная их часть не является самоходными, а агрегатируется с тракторами [2]. При эксплуатации прицепных машин проявляется достаточно сложная проблема, связанная с их боковым смещением относительно прямолинейной траектории движения трактора. Для устойчивой работы машинно-тракторного агрегата (МТА) «… необходимо обеспечивать строгую прямолинейность хода агрегата». Самым простым способом выполнения данного требования будет соблюдение следующего условия: «… чтобы вертикальная плоскость симметрии машины совпадала с продольной осью трактора»[19]. Смещение ширины захвата сельскохозяйственной машины вправо или влево от продольной оси трактора приводит к смещению в том же направлении самого трактора (и всего машинно-тракторного агрегата)[20], что, в свою очередь, ведет к нарушению агротехнических требований к технологическим операциям (прямолинейность хода МТА, требуемая ширина междурядий и т.п.).

Подобная проблема проявляется при эксплуатации МТА как с прицепной, так и с сельскохозяйственной машиной (орудием) с боковой навеской (например, косилка)[21]. Подобного рода устройства получили название асимметричных сельскохозяйственных машин (АСХМ). Данные АСХМ в полеводстве применяются весьма часто. Соответственно, вопросы совершенствования их эксплуатации являются достаточно актуальными. В частности улучшению устойчивости движения в технологическом процессе МТА с АСХМ, уделяется повышенное внимание[22] достаточного числа авторов [3]. Однако в предлагаемых ранее методах решения данной проблемы, на наш взгляд, имеются существенные недостатки.

На наш взгляд, несмотря на существенное количество научных исследований (статьи, диссертации, патенты и пр.), достаточно длительное время рассматривающих вопросы обеспечения устойчивости движения асимметричных сельскохозяйственных машин [4, 5], полностью данная проблема до сих пор не решена.

Так в работе [3] устойчивость движения АСХМ оценивалась по величине буксования то позволило установить оптимальную величину бокового смещения точки прицепа АСХМ к трактору. В ряде патентов[23,24,25] устойчивость движения АСХМ обеспечивалась

[19]Агрегатирование трактора с сельскохозяйственными машинами. [Электронный ресурс]. URL: https://centrobr.ru/wp-content/uploads/2023/02/lekcia-agregatirovanie-traktora.pdf (дата обращения 10.04.2026).

[20]Навесные полунавесные и прицепные машины. [Электронный ресурс] URL: https://transport.alleasing.ru/navesnye-polunavesnye-i-pritsepnye-mashiny (дата обращения 20.06.2026)

[21]Мещеряков В.А. Недовесов В.И. Сцепное устройство для асимметричных прицепных сельскохозяйственных машин. Патент №186793. Опубл. 03.10.1966 (72). Бюл. 19. [Электронный ресурс] URL: https://patents.su/2-186793-scepnoe-ustrojjstvo-dlya-asimmetrichnkh-pricepnykh-selskokhozyajjstvennykh-mashin.html?ysclid=mnssyv4sg8174966070 (дата обращения 20.06.2026)

[22] Недовесов В.И., Мещеряков В.А., Кудинов Ф.Ф., Белаш-Зубко А.Е., Бурмистров А.В., Солошенко О.И., Левченко П.В. Сцепное устройство для асимметричных прицепных сельскохозяйственных машин. Патент №195751. Опубл. 04.05.1967. Бюл. 10. [Электронный ресурс] URL: https://patentdb.ru/patent/195751 (дата обращения 20.06.2026)

[23]Тухватуллин Ф.Ф. Устройство для уравновешивания асимметричной прицепной уборочной машины. Патент RU №63165. Опубл. 27.05.2007. [Электронный ресурс] URL: https://poleznayamodel.ru/model/6/63165.html (дата обращения 20.06.2026)

уравновешиванием отклоняющего МТА момента от эксцентриситета точки приложения сил сопротивления со стороны ассиметричных сельскохозяйственных машин, что достигалось смещением «точки прицепа в продольном и поперечном направлениях относительно координатных осей, проведенных через центр вращения трактора». Для этих целей, с разной степенью эффективности, применялись разнообразные уравновешивающие механизмы, изменяющие либо нагрузку (отклоняющий момент) со стороны АСХМ на трактор, либо смещающие точку приложения данного отклоняющего момента относительно осевой линии трактора.

Например, И.В. Парасюк[26] уравновешивание МТА предлагал осуществлять за счет изменения конструкции прицепного устройства (введением пружинного механизма). Авторы работы [6] для уравновешивания МТА (на примере пахотного агрегата) применяли уравнения статики и динамики: анализируя условие равновесия системы сходящихся сил в аналитической или геометрической форме. Также анализировалась «модель уравнения устойчивости линейного движения комплексной машинно-тракторной обработки между рядами» в работе [7, с.22], что позволило авторам сформировать практические рекомендации для производства (комплектования культиваторов). В работах [8-10] исследовалась математическая модель курсовой устойчивости МТА при вспашке, как результат «силового равновесия пахотного агрегата», что позволило авторам обосновать предельные значения возмущающих факторов. В работе [11, с. 241] устойчивость движения МТА на пахоте обеспечивалась «…установкой на колеса трактора шин, обладающих рациональной величиной коэффициентов сопротивляемости боковому уводу».

Следовательно, основным методом решения данной проблемы в вышерассмотренных работах является внесение изменений в конструкцию непосредственно прицепного устройства, или смещение точки приложения смещающего МТА момента относительно прицепного устройства (статическое и динамическое уравновешивание МТА)[27].

Ранее авторами было предложено устройство для стабилизации асимметричной прицепной машины[28], отличительной особенностью которого являлось применение на агрегатируемой сельскохозяйственной машине колес разного диаметра, кинематически

---

[24] Литвинов О.И., Барабан Н.П., Петрушка А.Г., Литвинова Е.О. Устройство для уравновешивания ассиметричной прицепной уборочной машины. АС СССР № 1445618, Опубл. 23.12.1988. [Электронный ресурс] URL: https://patenton.ru/patent/SU1445618A1?ysclid=mnstivs2f3172888066 (дата обращения 20.06.2026).

[25] Литвинов О.И., Гурченко А.П., Шербаджи М.Р.. Бариловская Л.В. Уравновешивающее устройство для уборочного агрегата. АС СССР № 1773332, МПК A 01 D 75/28, Опубл. 07.11.1992. [Электронный ресурс] URL: https://patenton.ru/patent/SU1773332A1?ysclid=mnstl882s3674093434 (дата обращения 20.06.2026)

[26] Парасюк И.В., Литвинов А.И. Приспособление для уравновешивания асимметричных прицепных сельскохозяйственных машин. АС СССР № 378179. Опубл. 18.04.1973. Бюл. 19. [Электронный ресурс] URL: https://patents.su/2-378179-prisposoblenie-dlya-uravnoveshivaniya-asimmetrichnykh-pricepnykh-selskokhozyajjstvennchu.html (дата обращения 20.06.2026)

[27] Строганов Ю.Н., Огнев О.Г., Строганова О.Ю. Устройство для стабилизации прямолинейного движения прицепной асимметричной машины. Патент на изобретение RU 2819375, 20.05.2024. Заявка № 2023122838 от 04.09.2023. [Электронный ресурс] URL: https://patenton.ru/patent/RU2819375C1?ysclid=mnstzd1fpz751037127 (дата обращения 20.06.2026)

[28] Строганов Ю.Н., Огнев О.Г., Строганова О.Ю. Стабилизирующее устройство прямолинейного движения прицепной асимметричной машины. Патент на изобретение RU 2835131, 24.02.2025. Заявка № 2024128888 от 30.09.2024. [Электронный ресурс] URL: https://patenton.ru/patent/RU2835131C1?ysclid=mnsu088q1d95964349 (дата обращения 20.06.2026)

связанных между собой, причем правое колесо, расположенное в асимметричной части машины – большего диаметра в сравнении с левым. При этом левое колесо может подтормаживаться относительно правого, за счет чего обеспечивается их различная скорость движения, что и вызывает появление дополнительного, тягового усилия на правом колесе (от подтормаживания левого колеса), создающего стабилизирующий момент, направленный противоположно исходному отклоняющему моменту МТА и таким образом его компенсирующий (рис. 1).

Цель исследования – оценка способа обеспечения устойчивости движения машинно-тракторного агрегата с ассиметричной сельскохозяйственной машиной.

Материалы и методы. Таким образом, вместо ранее применявшихся, создающих дополнительный компенсирующий момент вариантов устройств, чрезмерная сложность которых негативно сказывается на их работоспособности, был предложен способ компенсации отклоняющего момента, смещающего (вследствие неравномерной нагрузки) МТА относительно его продольной оси, за счет «забегания» правой части АСХМ относительно левой (против часовой стрелки). Величина данного «забегания» может регулироваться усилием подтормаживания левого колеса относительно правого через фрикционную муфту, соединяющую полуоси колес. Величина данного подтормаживающего усилия устанавливается в зависимости от значений тягового усилия и отклоняющего момента для МТА

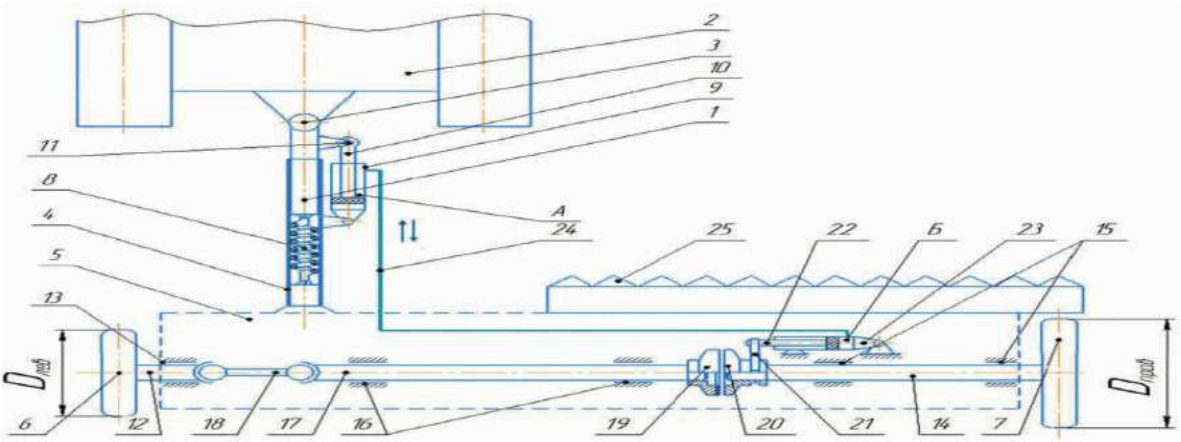


Рис. 1. Схема стабилизирующего устройства прямолинейного движения прицепной АСХМ[29]

1 – передняя часть тягового рычага; 2 – трактор; 3 – шарнирное крепление; 4 – задняя часть тягового рычага; 5 – рама прицепной машины; 6,7 – соответственно левое и правое колеса АСХМ; 8 – пружина растяжения; 9 – гидроцилиндр; 10 – шток гидроцилиндра; 11 – шарнир; 12, 14 – валы АСХМ; 13,15,16 – подшипники; 17 – промежуточный вал АСХМ; 18 – карданный вал; 19,20 – полумуфты фрикционной муфты; 21,22 – соответственно вилка и шток исполнительного гидроцилиндра; 23 – исполнительный гидроцилиндр; 24 – гидромагистраль; А – штоковая полость подающего гидроцилиндра; Б – поршневая полость исполнительного гидроцилиндра.

[29] Строганов Ю.Н., Огнев О.Г., Строганова О.Ю. Устройство для стабилизации прямолинейного движения прицепной асимметричной машины. Патент на изобретение RU 2819375 C1, 20.05.2024. Заявка № 2023122838 от 04.09.2023. [Электронный ресурс] URL: https://patenton.ru/patent/RU2819375C1?ysclid=mnstzd1fpz751037127. (дата обращения 20.06.2026).

Fig. 1. Diagram of a stabilizing device for rectilinear movement of a trailed asymmetrical agricultural machine

1 – front part of the drawbar; 2 – tractor; 3 – swivel mount; 4 – rear part of the drawbar; 5 – trailed machine frame; 6,7 – left and right wheels of asymmetrical agricultural machine; 8 – extension spring; 9 – hydraulic cylinder; 10 – hydraulic cylinder rod; 11 – hinge; 12, 14 – shafts of asymmetrical agricultural machine; 13,15,16 – bearings; 17 – countershaft of asymmetrical agricultural machine; 18 – drive shaft; 19,20 – friction clutch halves; 21,22 – hydraulic actuator yoke and rod; 23 – actuating hydraulic cylinder; 24 – hydraulic main line; A – rod-end chamber of the feed hydraulic cylinder; B – piston-side chamber of the hydraulic actuating cylinder.

Таким образом, предложенный метод позволит существенно упростить сам механизм компенсации отклоняющего момента, повысить надежность его функционирования, одновременно обеспечив достаточно простую, устойчивую связь между величинами отклоняющего и компенсирующего моментов (т.е. адаптивность поведения МТА с АСХМ в производственном процессе).

Практической задачей данной работы являлась проверка принципиальной работоспособности метода, а также выявление основных воздействующих на процесс устойчивости МТА с АСХМ параметров. Для упрощения расчетов значения действующих на систему сил приняли постоянными (равными их максимальным значениям в данных условиях).

Результаты. Схема действующих на прицепное сельскохозяйственное орудие сил представлена на рисунке 2. Здесь за основу была взята схема соединения прицепного агрегата с движительным устройством (рис. 1), ширину колес АСХМ не учитывали. При этом плоскость движения (качения) левого колеса АСХМ совпадает с плоскостью качения левого колеса трактора (отнесена влево от точки сцепки АСХМ). Причем увеличение этого расстояния улучшает стабилизацию прицепной машины, но нецелесообразно по технологическим соображениям (ухудшается управляемость МТА). А его уменьшение – неуравновешенность АСХМ относительно траектории движения трактора только усиливает.

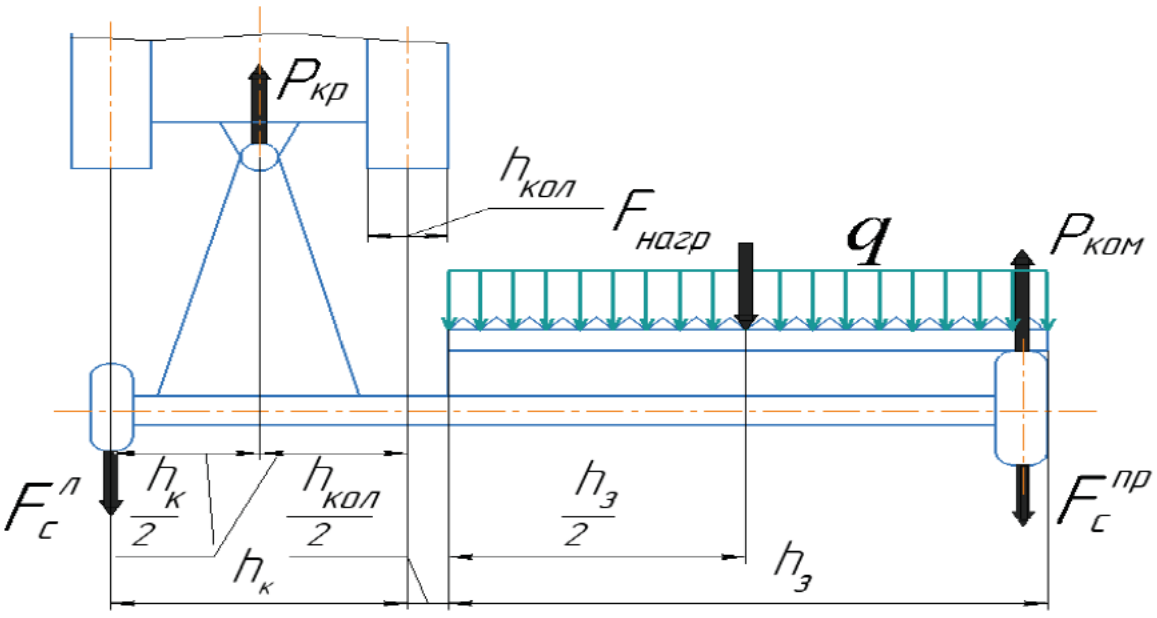


Рис. 2. Схема сил, действующих на прицепную АСХМ

Fig. 2. Diagram of the forces acting on the trailed asymmetrical agricultural machine

Условием устойчивого движения МТА с асимметричной прицепной машиной в таком случае будет соблюдение равенства моментов всех действующих на АСХМ сил относительно точки ее присоединения к трактору:

$$F_c^{л} \cdot \frac{h_к}{2} = F_c^{пр}\left(h_з + \frac{h_к}{2} + \frac{h_{кол}}{2}\right) + q \cdot h_з\left(\frac{h_з}{2} + \frac{h_к}{2} + \frac{h_{кол}}{2}\right) - P_{ком}\left(h_з + \frac{h_к}{2} + \frac{h_{кол}}{2}\right), \quad (1)$$

где $F_c^{л}, F_c^{пр}$ – сила сопротивления перекатыванию соответственно левого и правого колес АСХМ, Н; $h_з$ – ширина захвата АСХМ, м; $h_к$ – ширина колеи трактора, м; $h_{кол}$ – ширина колеса (протектора) трактора, м; q – удельное сопротивление движению АСХМ (рабочая нагрузка), Н/м; $F_{нагр}$ – рабочая нагрузка на сельхозмашину (например, сопротивление травостоя резанию), Н; $P_{ком}$ – компенсирующая (противодействующая отклоняющему моменту) сила на правом колесе АСХМ, Н.

Учитывая, что сила сопротивления качению прямо пропорциональна силе реакции опоры (массе машины) и коэффициенту сопротивления качению, обратно пропорциональна радиусу катящегося колеса, то для левого и правого колес ее можно записать как:

$$F_c^{л} = \frac{N \cdot f_{тр}^{к}}{R_л} = \frac{m_{АСХМ} \cdot g \cdot f_{тр}^{к}}{2R_л}, \quad (2)$$

$$F_c^{пр} = \frac{N \cdot f_{тр}^{к}}{R_{пр}} = \frac{m_{АСХМ} \cdot g \cdot f_{тр}^{к}}{2R_{пр}}, \quad (3)$$

где N – сила реакции опор колес АСХМ, Н; $f_{тр}^{к}$ – коэффициент сопротивления трению качения; $R_л$, $R_{пр}$ – радиус соответственно левого и правого колес АСХМ, м; $m_{АСХМ}$ – масса АСХМ, кг; g – ускорение свободного падения, м/с^2.

Тогда, с учетом выражений (2) и (3), выражение (1) можно записать как:

$$P_{ком} = \frac{q \cdot h_з\left(\frac{h_з}{2} + \frac{h_к}{2} + \frac{h_{кол}}{2}\right) + \frac{m_{АСХМ}}{2R_{пр} \cdot R_л} \cdot g \cdot f_{тр}^{к}\left(R_л\left(h_з + \frac{h_{кол}}{2}\right) + \frac{h_к}{2}\left(R_л - R_{пр}\right)\right)}{h_з + \frac{h_к}{2} + \frac{h_{кол}}{2}}. \quad (4)$$

В качестве примера при моделировании нами рассматривался вариант применения прицепной тракторной косилки КРП-302-01, агрегатируемой с трактором типа МТЗ-82.1 (таблица), как одной из наиболее массивных и нагруженных прицепных сельхозмашин.

Таблица. Исходные данные МТА с косилкой КРП-302-01 при моделировании (согласно данным [12-15], а также [30,31,32])

Table. The baseline data of the tractor-implement unit with KRP-302-01 mower during modeling (according to the data in [12-15] and also[12,13,14])

Параметр	Обозначение	Значение показателя
Масса косилки, кг	m	1600
Агрегатирование (трактор тягового класса 1,4), требуемая мощность, кВт		78-100

[30] Косилка роторная прицепная Berkut. [Электронный ресурс] URL: https://www.kleverltd.ru/catalog/kormouborochnaya/koshenie/BERKUT/ (дата обращения 22.06.2026).

[31] ГОСТ 7463-2003. Шины пневматические для тракторов и сельскохозяйственных машин. [Электронный ресурс] URL: https://transavtomarket.by/prajs/index.php?option=com_content&view=article&id=48&catid=2&ysclid=mn2wl8e4m4581482464 (дата обращения 22.06.2026).

[32] Основные данные по технической характеристике сельскохозяйственных машин [Электронный ресурс] URL: https://megaobuchalka.ru/8/15583.html (дата обращения 22.06.2026).

Рабочая ширина захвата косилки, м	$h_з$	3,2
Удельная нагрузка кошения, Н/м	q	800
Ширина колеи трактора, м	$h_к$	1,4
Ширина колес трактора, м	$h_{кол}$	0,393
Диаметр колеса СХМ, м	$D_{кол}$	0,845
Рабочая скорость, км/час, не более	V	15
Потребляемая мощность, кВт, не более	P	55
Коэффициент сопротивления трению качению	$f_{тр}^{к}$	0,06

Математическое моделирование выражения (4), в случае использования колес АСХМ одинакового диаметра, показывает следующее (рис. 3). Формирование дополнительного (компенсирующего) момента на правом колесе АСХМ приводит к увеличению тягового усилия трактора, необходимого для агрегатирования сельхозмашины на 7-18 % (в зависимости от нагрузки). При этом ширина захвата сельхозмашины (ширина активной рабочей части) оказывает даже более сильное воздействие на величину компенсирующей силы, чем удельная нагрузка на АСХМ.

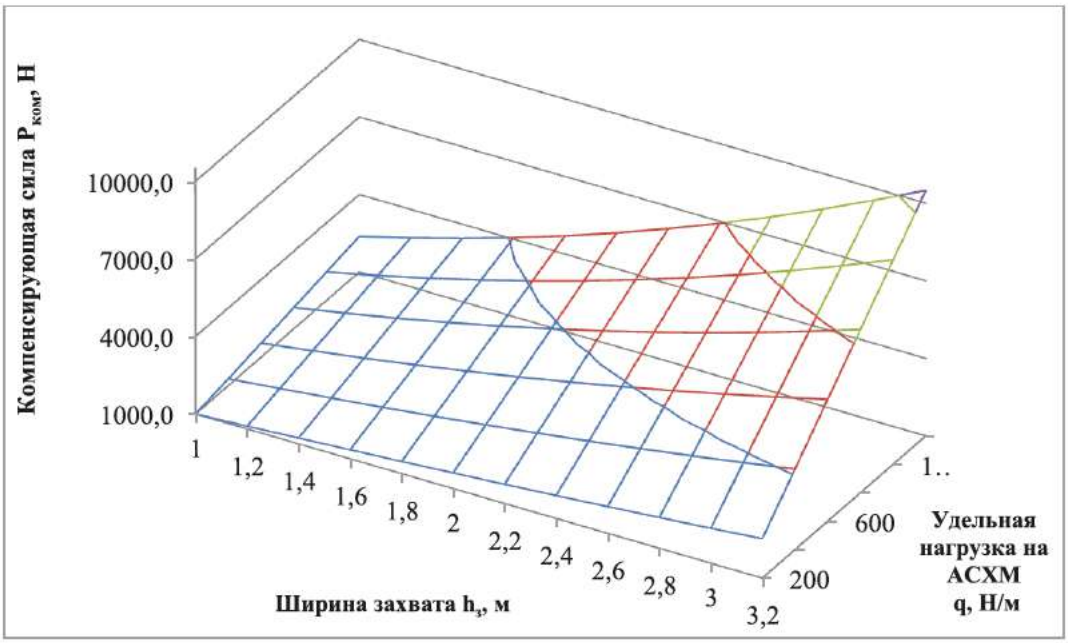


Рис. 3. Компенсирующая сила в зависимости от удельной нагрузки и ширины захвата АСХМ
Fig. 3. Compensating force depending on specific load and working width of the asymmetrical agricultural machine

Результат применения в АСХМ колес разного диаметра (как было предложено в работе[33]), представлен на рисунке 4. Данные рисунка 4 подтверждают существенное (на 3-14

[33] Строганов Ю.Н., Огнев О.Г., Строганова О.Ю. Устройство для стабилизации прямолинейного движения прицепной асимметричной машины. Патент на изобретение RU 2819375 C1, 20.05.2024. Заявка № 2023122838 от 04.09.2023. [Электронный ресурс] URL: https://patenton.ru/patent/RU2819375C1?ysclid=mnstzd1fpz751037127 (дата обращения 20.06.2026).

%) снижение компенсирующей силы на правом колесе при увеличении соотношения диаметров колес АСХМ, что подтверждает работоспособность предложенного принципа компенсации разворота АСХМ. Стоит одновременно отметить, что подобный эффект наиболее сильно проявляется при небольших значениях ширины захвата (1-2 м) и удельной нагрузки (200-600 Н/м) на АСХМ. При увеличении ширины захвата АСХМ данный эффект снижается.

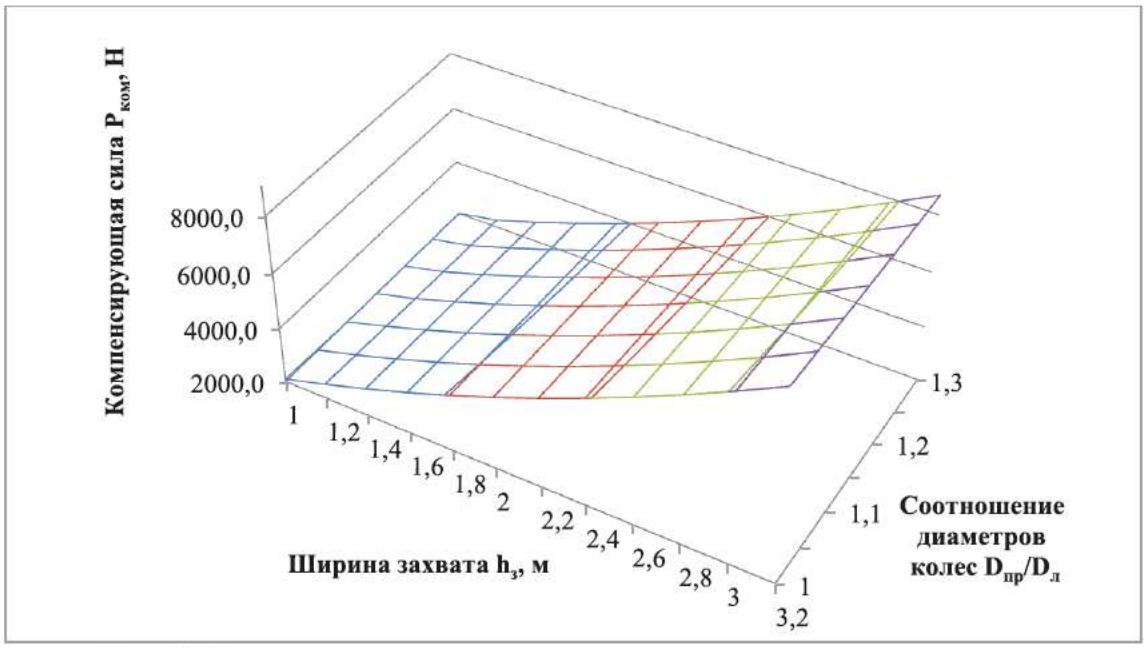


Рис. 4. Компенсирующая сила в зависимости от ширины захвата и соотношения диаметров колес АСХМ

Fig. 4. Compensating force depending on the working width and the ratio of wheel diameters of the asymmetrical agricultural machine

Вместе с тем, данные рисунка 5 показывают, что на величину компенсирующей силы удельная нагрузка на АСХМ оказывает гораздо более сильное влияние, чем соотношение диаметров ее колес. Так значение необходимой компенсирующей силы, при увеличении соотношения диаметров колес на 30 %, сокращается всего на 2,5-11,4 %. Тогда как повышение удельной нагрузки на такую же величину (25-33 %) повышает значение потребной компенсирующей нагрузки на 22-29 %.

Стоит также отметить, что подобный эффект «сглаживается» для более массивных АСХМ с большой шириной захвата.

На рисунке 6 представлена зависимость величины необходимой компенсирующей силы от соотношения диаметров правого и левого колес АСХМ. Данные рисунка 6 показывают, что уменьшение диаметра правого колеса АСХМ требует приложения существенно большей (на 2-20,5 %) компенсирующей силы Уменьшение диаметра левого колеса АСХМ величину необходимой компенсирующей силы снижает незначительно (до 4,3 %). Стоит отметить, что изменение соотношения диаметров колес АСХМ наиболее выгодно для сельскохозяйственных машин малой массы и ширины захвата.

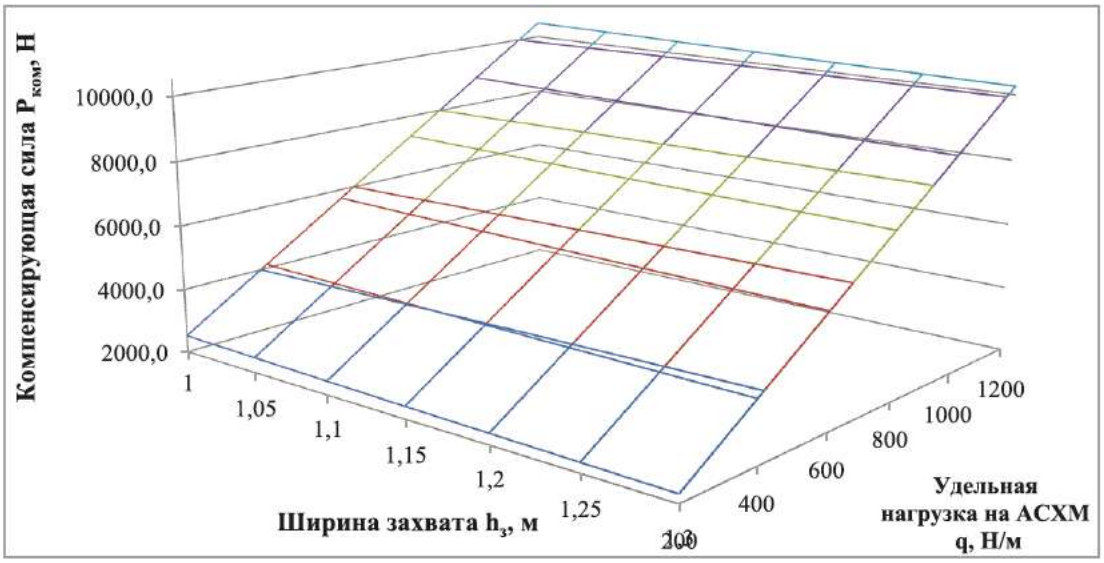


Рис. 5. Компенсирующая сила в зависимости от соотношения диаметров колес и удельной нагрузки АСХМ

Fig. 5. Compensating force depending on the ratio of wheel diameters and specific load of the asymmetrical agricultural machine

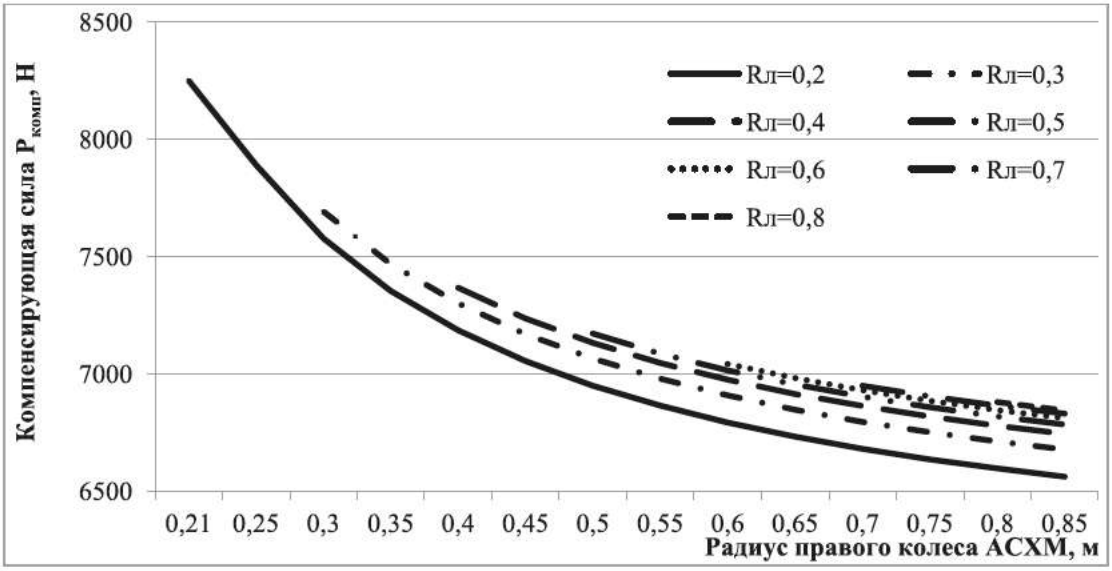


Рис. 6. Компенсирующая сила в зависимости от диаметров колес АСХМ

Fig. 6. Compensating force depending on wheel diameters of the asymmetrical agricultural machine

Из полученных данных видно также, что интенсивность нарастания необходимой компенсирующей силы практически не зависит от величины диаметра левого колеса (рис. 7).

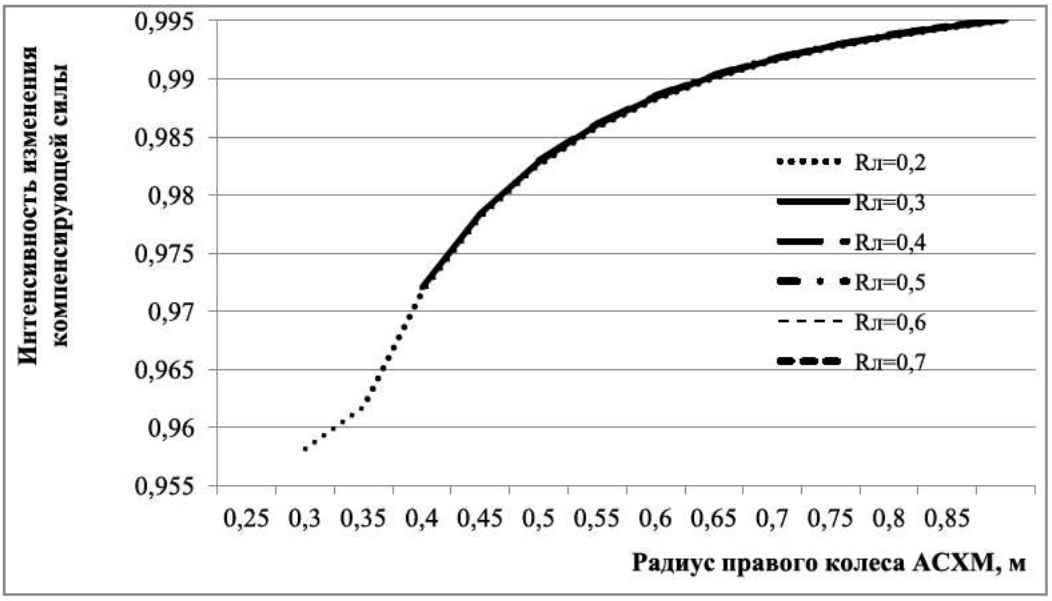


Рис. 7. Интенсивность изменения компенсирующей силы в зависимости от размеров колес АСХМ

Fig. 7. The intensity of the compensating force variation depending on the wheel size of the asymmetrical agricultural machine

Для определения величины необходимого тормозящего усилия на левом колесе АСХМ необходимо равенство линейных скоростей колес трактора и АСХМ (рис. 8):

$$V_{тр} = V_{л}^{АСХМ} = V_{пр}^{АСХМ}, \quad (5)$$

где: $V_{тр}$, $V_{л}^{АСХМ}$, $V_{пр}^{АСХМ}$ – скорости соответственно колес трактора, левого и правого колес АСХМ, м.

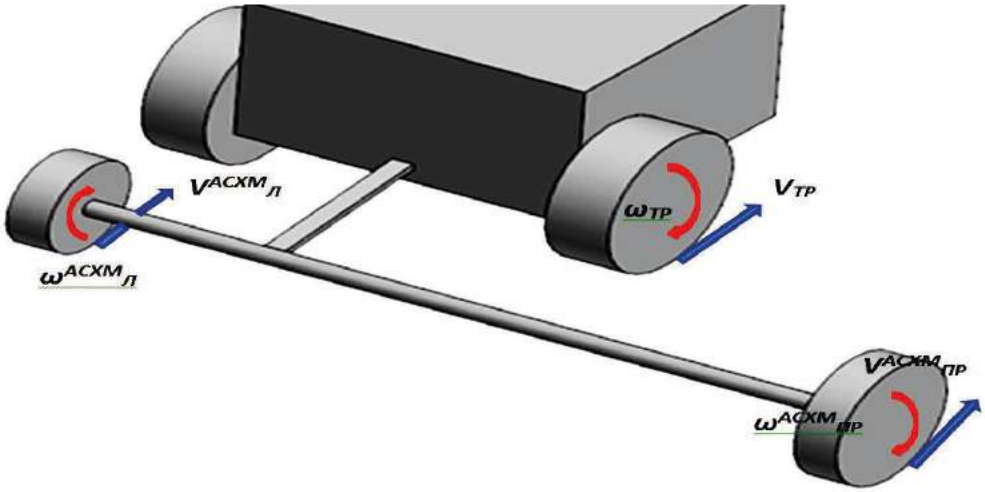


Рис. 8. Условие равенства скоростей колес трактора и АСХМ

Fig. 8. Condition of equal speeds of the wheels of tractor and asymmetrical agricultural machine

Тогда, с учетом угловых скоростей и радиусов колес трактора и АСХМ, выражение (5) можно записать как:

$$\omega_{тр} * R_{кол} = \omega_{л}^{АСХМ} * R_{л} = \omega_{пр}^{АСХМ} * R_{пр}, \quad (6)$$

где: $\omega_{тр}$, $\omega_{л}^{АСХМ}$, $\omega_{пр}^{АСХМ}$ – угловые скорости соответственно колес трактора, левого и правого колес АСХМ, м$^{-1}$; $R_{кол}$ – радиус задних колес трактора, м.

В случае применения в АСХМ правых колес большего (относительно левого) диаметра, выражение (6) примет следующий вид (при этом левое и правое колеса АСХМ должны вращаться независимо друг от друга):

$$\omega_л^{АСХМ} = \frac{V_{тр}}{R_л},$$
$$\omega_{пр}^{АСХМ} = \frac{V_{тр}}{R_{пр}} \neq \omega_{пр}^{АСХМ}, \quad (7)$$
$$\Delta\omega = \omega_л^{АСХМ} - \omega_{пр}^{АСХМ} = V_{тр}\left(\frac{1}{R_л} - \frac{1}{R_{пр}}\right) = V_{тр}\left(\frac{R_{пр}-R_л}{R_л * R_{пр}}\right).$$

Создаваемая на правом колесе дополнительная компенсирующая сила $P_{комп}$ будет формироваться за счет подтормаживания левого колеса, величина момента (подтормаживания) которого $M_{торм}^л$ определится как:

$$M_{торм}^л = P_{комп}^л * R_л, \quad (8)$$

где $P_{комп}^л$ – компенсирующая (подтормаживающая) сила на левом колесе АСХМ, Н.

Величина самой компенсирующей силы на левом колесе АСХМ будет определяться из равенства восстанавливающих прямолинейность хода моментов на левом и правом колесах АСХМ, создаваемых соответствующими компенсирующими силами, относительно продольной оси движения МТА:

$$P_{комп}^л * \frac{h_к}{2} = P_{комп} * (h_з + \frac{h_к}{2} + \frac{h_{кол}}{2}). \quad (9)$$

Тогда можно записать выражение (8) как:

$$M_{торм}^л = P_{комп}^л * R_л = P_{комп}\left(\frac{h_з}{h_к} + 1 + \frac{h_{кол}}{h_к}\right) * R_л. \quad (10)$$

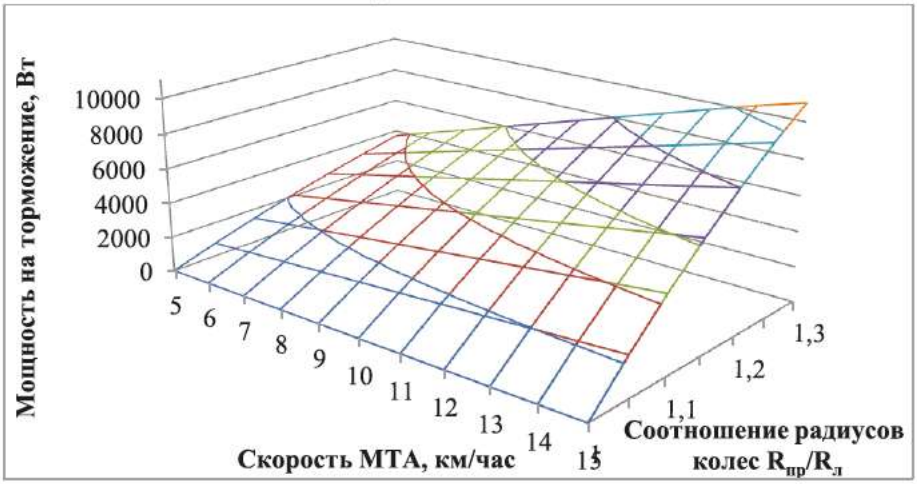
Учитывая, что мощность, необходимая для подтормаживания левого колеса АСХМ, связана с передаваемым им моментом через частоту вращения, можно записать:

$$\boldsymbol{P_{торм}} = M_{торм} * \omega = P_{комп}\left(\frac{h_з}{h_к} + 1 + \frac{h_{кол}}{h_к}\right) * R_л * (\omega_л^{АСХМ} - \omega_{пр}^{АСХМ}), \quad (11)$$

или, с учетом выражения (7):

$$\boldsymbol{P_{торм}} = P_{комп}\left(\frac{h_з}{h_к} + 1 + \frac{h_{кол}}{h_к}\right) * R_л * V_{тр}\left(\frac{1}{R_л} - \frac{1}{R_{пр}}\right). \quad (12)$$

Зависимость величины момента, требуемого для подтормаживания левого колеса АСХМ, от некоторых параметров работы МТА представлена на рисунке 9. Из представленных данных следует, что величина мощности, расходуемой на подтормаживание АСХМ, составляет 1-8,5 % от номинальной мощности ДВС МТА (не более 14 % для наиболее нагруженных условий работы), что подтверждает принципиальную возможность применения данного метода повышения устойчивости движения АСХМ.



$h_з$ = 3,2 м; $h_к$ = 1,4 м; $h_{кол}$ = 0,393 м; $R_л$ = 0,422 м; $P_{комп}$ = 4000 Н.

Рис. 9. Мощность, требуемая на подтормаживание левого колеса АСХМ

Fig. 9. Power required for braking slightly the left wheel of the asymmetrical agricultural machine

Обсуждение. Применение в составе МТА прицепной АСХМ приводит к появлению на ее правой стороне значительного момента, разворачивающего весь МТА вправо по направлению его движения. Для компенсации подобного разворота механизатору необходимо прикладывать существенные и постоянные усилия на подруливание трактора (в противоположную, левую сторону), или искажать прямолинейность технологической траектории, что приводит к нарушениям агротехнических требований при полевых работах. Формирование дополнительного (компенсирующего) момента на правом колесе АСХМ приводит к увеличению тягового усилия трактора, необходимого для агрегатирования МТА на 7-18 % (в зависимости от нагрузки). Причем величина компенсирующего усилия значительно возрастает для массивных, широкозахватных АСХМ при их высокой рабочей нагрузке и может достигать 6-10 кН. Несмотря на то, что современные тракторные навески рассчитаны на существенно большие усилия (до 70-120 кН для тракторов мощностью 90-100 кВт)[34], подобные значения дополнительных усилий вызывают значительные затруднения в управлении МТА.

Наиболее сильное воздействие на величину разворачивающего усилия оказывают такие факторы, как ширина захвата АСХМ (ее 3-кратное увеличение: с 1 до 3,2 м повышает значение компенсирующей силы в 2,6-4,4 раза); удельная нагрузка на АСХМ (ее увеличение на 56 % приводит к росту необходимой компенсирующей силы на 39-41 %); соотношение диаметров правого и левого колес (увеличение этого соотношения на 30 % приводит к снижению компенсирующей силы на 2,5-11,4 %). Применение на АСХМ колес малого диаметра на величину компенсирующего усилия влияет незначительно: увеличение диаметра левого колеса на 40-50 % повышает значение компенсирующей силы на 1-1,5 %, а аналогичное увеличение диаметра правого колеса снижает значение компенсирующей силы на 4,5-8,9 %.

Затраты мощности на подтормаживание левого колеса АСХМ (для компенсации разворота МТА) составляют 1,1-6,6 кВт (для скорости 7-9 км/час), т.е. 1-8,5 % от мощности трактора, что составляет 2-12 % от всей мощности трактора, необходимой для агрегатирования МТА (трактор тягового класса 1,4 с косилкой КРП-302-01) – до 55 кВт (табл. 1).

Выводы. На основании вышеприведенных данных можно утверждать следующее. Математическое моделирование движения прицепной АСХМ в составе МТА подтвердило принципиальную возможность применения вышеописанного способа стабилизации МТА. Формирование компенсирующего усилия (разворачивающего момента) на правом колесе АСХМ стабилизирует движение сельхозмашины относительно продольной оси движения трактора, одновременно увеличивая необходимое для агрегатирования тяговое усилие на 7-18 %, что является приемлемой величиной – позволяет применять данный метод стабилизации движения МТА с АСХМ без его переукомплектовывания.

Наибольшее влияние на величину компенсирующей силы оказывают такие параметры, как рабочая ширина захвата сельскохозяйственной машины, удельная рабочая нагрузка на нее (удельное сопротивление на 1 м ширины захвата сельхозмашины); величина и соотношение диаметров левого и правого колес АСХМ оказывают незначительное влияние.

[34] Система тракторных навесок TAS. [Электронный ресурс] URL: https://mehtransservis.ru/images/koren/3_pdf_1496049676.pdf (дата обращения 20.06.2026).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Данилов Д.Ю., Завиваев С.Н. Технологическое обновление сельскохозяйственного машинно-тракторного парка региона // Вестник НГИЭИ. 2024. №11 (162). С. 84-93. https://doi.org/10.24412/2227-9407-2024-11-84-93

2. Сазонов Д.С., Ерзамаев М.П. Пути повышения производительности машинно-тракторных агрегатов // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2009. № 3. С. 16-19. EDN: KJVPXB

3. Орловский С.Н., Карнаухов А.И., Соколова В.А., Ореховская А.А., Алексеева С.В., Парфенопуло Г.К., Арико С.Е. Факторы, влияющие на устойчивость прямолинейного движения агрегата с асимметричной сажалкой сеянцев // Известия ТулГУ. Технические науки. 2022. № 12. С. 714-718. https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-12-714-718

4. Л.В. Гячев. Устойчивость движения сельскохозяйственных машин и агрегатов. М.: Машиностроение, 1981. 206 с.

5. Граборов В.Н., Жилкин В.А. Устойчивость движения прицепной валковой жатки ЖВП-9,1 «Дрофа» // Достижения науки и техники АПК. 2007. № 6. С. 31-35. https://cyberleninka.ru/article/n/ustoychivost-dvizheniya-pritsepnoy-valkovoy-zhatki-zhvp-9-1-drofa

6. Божко И.В., Пархоменко Г.Г., Камбулов С.И. Условия равновесия сельскохозяйственных машин для основной обработки почвы // Инженерные технологии и системы. 2019. № 29 (4). С. 578-593. https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201904.578-593

7. Солиев Х.М., Тухтабаев М.А., Сотволдиев М. Построение расчетных моделей прямолинейного движение курсового устойчивости широкозахватного пропашного тракторного агрегата // Точная наука, Выпуск 114, 2021. С. 20-27. https://idpluton.ru/wp-content/uploads/tv114.pdf

8. Трояновская И.П., Жаков А.О. Курсовая устойчивость машинно-тракторного агрегата при вспашке // Тракторы и сельхозмашины. 2020. № 6. С. 41-49. https://doi.org/10.31992/0321-4443-2020-6-41-49

9. Жаков А.О., Трояновская И.П. Модель отклонения трактора от прямолинейного движения под действием внешних нецентральных сил // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. 2020. № 20 (3). С. 15-23. URL: https://sciup.org/147233481

10. Жаков А.О., Трояновская И.П. Учет сил со стороны рабочего орудия в управлении беспилотным тракторным агрегатом // Мехатроника, автоматика и робототехника. 2024. №13. С. 70-72. https://doi.org/10.26160/2541-8637-2024-13-70-72

11. Кравченко В.А., Кравченко Л.В., Сергеев Н.В., Журба В.В. Методика определения характеристик траекторного движения пропашного машинно-тракторного агрегата // Инженерные технологии и системы. 2026. № 36(2). С. 238-261. https://doi.org/10.15507/2658-4123.26362.238-261 EDN: IRZVVU

12. Яшин С.Н., Боронин О.С., Лухманова Т.В. Анализ методов оценки управляемости и устойчивости автотранспортных средств в рамках повышения безопасности дорожного движения // Безопасность и охрана труда. 2023. № 2. С. 29-35. https://doi.org/10.54904/52952_2023_2_29 EDN: IPBXCH

13. Ворохобин А.В., Устинов Ю.Ф., Жулай В.А. Методика оценки тягово-сцепных свойств трехосного полноприводного трактора и влияния его колебаний, воздействующих на

оператора/ // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2022. Т. 15. № 1(72). С. 34-39. https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2022_1_34 EDN: RFFFSX

14. Ясюкович Э.И. Имитационное моделирование мобильности беспилотного курсового движения колесного трактора // Вестник Белорусско-Российского университета. 2025. № 3 (88). С. 100-109. https://doi.org/10.24412/2077-8481-2025-3-100-109 EDN: QSULVY

15. Малюков С.В., Поздняков Е.В., Шавков М.В., Петков А.Ф., Шанин И.И., Болгов А.В. Анализ современных конструкций комбинированных почвообрабатывающих машин и агрегатов // Известия НВ АУК: Наука и высшее профессиональное образование. 2023. № 2(70). С. 523-534. https://doi.org/10.32768/2071-9485-2023-02-61

REFERENCES

1. Danilov D.Yu., Zavivaev S.N. Technological renewal of the agricultural machine and tractor fleet of the region. Vestnik NGIEI = Bulletin of Nizhny Novgorod State Engineering and Economic University. 2024;11 (162): 84-93. (In Russ.) https://doi.org/10.24412/2227-9407-2024-11-84-93

2. Sazonov D.S., Erzamaev M.P. Ways to increase productivity of machine and tractor units// Izvestiya Samarskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii = Bulletin Samara State Agricultural Academy 2009;3:16-19. (In Russ.) EDN: KJVPXB

3. Orlovskiy S.N., Karnaukhov A.I., Sokolova V.A., Orekhovskaya A.A., Alekseeva S.V., Parfenopulo G.K., Ariko S. Ye. Factors affecting the stability of the rectilinear movement of the unit with asymetric seedler planter. Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki. = Izvestiya Tula State University. Technical Sciences. 2022;12:714-718. (In Russ.) https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-12-714-718

4. Gachev L.V. Stability of movement of agricultural machinery and aggregates. M.: Mashinostroenie. 1981. 206 p. (In Russ.)

5. Graborov V.N., Zhilkin V.A. Stability of movement of the trailed roller harvester ZHVP-9.1 “Drifa”. Dostizheniya nauki i tekhniki APK = Achievements of Science and Technology in Agro-Industrial Complex 2007;6:. 31-35. (In Russ.) URL: https://cyberleninka.ru/article/n/ustoychivost-dvizheniya-pritsepnoy-valkovoy-zhatki-zhvp-9-1-drofa

6. Bozhko I.V., Parkhomenko G.G., Kambulov S.I. Equilibrium conditions of agricultural machines for main tillage. Inzhenernie technologii i sistemi = Engineering Technologies and Systems. 2019;29 (4): 578-593.(In Russ.) https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201904.578-593

7. Soliev Kh.M., Tukhtabayev M.A., Sotvoldiev M. Construction of calculation models of the straight-line motion of the course stability of the wide-covered road tractor unit. Tochnaia nauka = Exact Science. 2021;114:20-27. (In Russ.) URL: https://idpluton.ru/wp-content/uploads/tv114.pdf

8. Troyanovskaya I.P., Zhakov A.O. Road holding ability of machine-tractor unit during plowing. Traktori i selchozmachini = Tractors and Agricultural machinery. 2020;6:41-49. (In Russ.) https://doi.org/10.31992/0321-4443-2020-6-41-49

9. Zhakov A.O., Troyanovskaya I.P. Tractor motion model with deviation from a rectilinear movement under the influence of external off-center forces. Vesrnik Uzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seria Mashinostroenie. = Bulletin of the South Ural State University. Series: Mechanical Engineering. 2020; 20 (3):15-23. (In Russ.) URL: https://sciup.org/147233481

10. Zhakov A.O., Troyanovskaya I.P. Accounting for forces from the working implement in control of an unmanned tractor unit. Mekhatronika, avtomatika i robototekhnika = Mechatronics,

Automation and Robotics. 2024;13:70-72. (In Russ.) https://doi.org/10.26160/2541-8637-2024-13-70-72

11. Kravchenko V.A., Kravchenko L.V., Sergeev N.V., Zhurba V.V. The methods for determining the characteristics of the trajectory movement of a row machine-tractor unit. Inzhenernie technologii i sistemi = Engineering Technologies and Systems. 2026;36 (2): 238-261. (In Russ.) https://doi.org/10.15507/2658-4123.26362.238-261 EDN: IRZVVU

12. Yashin S.N., Boronin O.S., Lukhmanova T.V. Analysis of methods for assessing the controllability and stability of vehicles in the framework of improving road safety. Bezhopasnost i ochrana truda = Occupational Safety and Health. 2023;2:29-35. (In Russ.) https://doi.org/10.54904/52952_2023_2_29 EDN: IPBXCH

13. Vorokhobin A.V., Ustinov Yu. F., Zhulai V. A. Methodology for assessing traction and coupling capacity of a three-axle all-wheel drive tractor and the impact of its vibrations on the operator. Vestnik Voronejskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Vestnik of Voronezh State Agrarian University. 2022;15-1(72):34-39. (In Russ.) https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2022_1_34 EDN: RFFFSX

14. Yasyukovich E.I. Simulation modeling of mobility of unmanned course movement of a wheeled tractor. Vestnik Belorussko-Rossijskogo universiteta = Vestnik of Belarusian-Russian University. 2025;3 (88):100-109. (In Russ.) https://doi.org/10.24412/2077-8481-2025-3-100-109 EDN: QSULVY

15. Malyukov S.V., Pozdnyakov E.V., Shavkov M.V., Petkov A.F., Shanin I.I., Bolgov A.V. Analysis of modern designs of combined tillage machines and units. Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professional'noe obrazovanie = Proceedings of Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Education. 2023; 2(70): 523-534. (In Russ.) https://doi.org/10.32768/2071-9485-2023-02-61

Об авторах	**About the authors**
Вихрова Татьяна Вениаминовна, старший преподаватель кафедры «Прикладная механика, физика и инженерная графика», Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, Санкт-Петербург, Россия tv1948v@yandex.ru	**Tatyana V. Vikhrova**, senior lecturer, Department of Applied Mechanics, Physics and Engineering Graphics, Saint Petersburg State Agrarian University, Saint Petersburg, Russia tv1948v@yandex.ru
Датхужева Рузана Хазретовна, старший преподаватель кафедры «Прикладная механика, физика и инженерная графика», Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, Санкт-Петербург, Россия ruzana_h@list.ru	**Ruzana Kh. Datkhuzheva**, senior lecturer, Department of Applied Mechanics, Physics and Engineering Graphics, Saint Petersburg State Agrarian University, Saint Petersburg, Russia ruzana_h@list.ru
Виздрик Геннадий Михайлович, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Прикладная механика, физика и инженерная графика», Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, Санкт-Петербург, Россия gennadiy.w@googlemail.com	**Gennady M. Vizdrik**, PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Department of Applied Mechanics, Physics, and Engineering Graphics, Saint Petersburg State Agrarian University, Saint Petersburg, Russia gennadiy.w@googlemail.com
Огнев Олег Геннадьевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой	**Oleg G. Ognev**, DSc (Engineering), Professor, Head of the Department of

«Прикладная механика, физика и инженерная графика», Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, Санкт-Петербург, Россия ognew.og@mail.ru https://orcid.org/0009-0004-0843-7597	Applied Mechanics, Physics and Engineering Graphics, Saint Petersburg State Agrarian University, Saint Petersburg, Russia ognew.og@mail.ru https://orcid.org/0009-0004-0843-7597
Юрий Николаевич Строганов, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры подъемно-транспортных машин и роботов, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия yurij.stroganov@mail.ru https://orcid.org/0009-0007-4203-6748	**Yuri N. Stroganov**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Lifting and Transport Machines and Robots, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia yurij.stroganov@mail.ru https://orcid.org/0009-0007-4203-6748
Заявленный вклад авторов Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации	**Authors' contribution** All authors made an equivalent contribution to the preparation of the manuscript
Конфликт интересов Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат	**Conflict of interest** The authors declare that there is no conflict of interest and they bear equal responsibility for plagiarism
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи к публикации	The authors have read and approved the final version of the manuscript for publication.
Статья поступила в редакцию: 04.05.2026	**Received:** 04.05.2026
Одобрена после рецензирования: 21.07.2026	**Approved after reviewing:** 21.07.2026
Принята к публикации: 11.09.2026	**Accepted for publication:** 11.09.2026

Научная статья
УДК 621.892.2-1 DOI 10.24412/2713-2641-2026-3128-71-80

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕСУРСНОГО ПОТЕНЦИАЛА АВТОТРАКТОРНЫХ МОТОРНЫХ МАСЕЛ

Илья Юрьевич Якименко[1]✉, Рамиль Тагирович Хакимов[2]

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

[1] y@kimenko.ru https://orcid.org/0000-0003-4256-9425
[2] haki7@mail.ru https://orcid.org/0000-0003-4858-3586

Аннотация. В условиях ограничения поставок оригинальных моторных масел для импортной автотракторной техники обостряется проблема применения неоригинальных смазочных материалов. Процессы деградации масел в таких условиях изучены недостаточно, а рекомендации производителей техники и масел часто не согласованы. Отсутствие чётких методов и стандартов оценки отработанного масла в Российской Федерации приводит к ошибкам управления, аварийным отказам и внеплановым простоям. Цель исследования – разработка методологии расчёта ресурсного потенциала автотракторных моторных масел. Методами сравнительного анализа российских национальных стандартов (ГОСТ 33159-2021, ГОСТ 34242-2017, ГОСТ 1461-2023) и международного стандарта ASTM D5185 (атомно-эмиссионная спектрометрия с индуктивно связанной плазмой, ICP-AES) оценена возможность определения продуктов износа, загрязнений и присадок; применён термодинамический подход с производством энтропии и S-образной кривой деградации. Установлено, что ГОСТ 33159-2021 фиксирует только суммарное содержание нерастворимых веществ без поэлементного анализа, ГОСТ 34242-2017 определяет только никель, ванадий и железо, тогда как ASTM D5185 охватывает 22 элемента, включая критичные индикаторы износа и основные присадки, а время анализа составляет несколько минут. Изменение состояния масла описывается S-образной кривой с точками A, B и C, а ресурсный потенциал определяется шириной интервала A–B. Показано, что применение ASTM D5185 позволяет одновременно контролировать элементы износа и загрязнения, отслеживать изменение концентрации трёх типов присадок во времени и строить линии тренда для прогнозирования остаточного ресурса, однако российская нормативная база не обеспечивает этих требований и единства данных между лабораториями. Для определения ресурсного потенциала моторных масел в эксплуатации целесообразно использовать ASTM D5185. Для внедрения методики в производственную систему отечественные стандарты необходимо дополнить требованиями поэлементного анализа по перечню ASTM D5185.

Ключевые слова: смазочные масла, ресурсный потенциал, техническое обслуживание, условия эксплуатации, автотракторная техника

Для цитирования: Якименко И.Ю., Хакимов Р.Т. Определение ресурсного потенциала автотракторных моторных масел // АгроЭкоИнженерия. 2026. № 3(128). С. 71-81 https://doi.org/ 10.24412/2713-2641-2026-3128-71-80

Research article
Universal Decimal Code 621.892.2-1

DEVELOPING A TESTING METHODOLOGY TO CHARACTERIZE THE DEGRADATION PROCESS OF USED ENGINE OILS

Ilya Y. Yakimenko[1]✉, Ramil T. Khakimov[2]

Saint Petersburg State Agrarian University, Saint Petersburg, Russia

[1] y@kimenko.ru https://orcid.org/0000-0003-4256-9425
[2] haki7@mail.ru https://orcid.org/0000-0003-4858-3586

Abstract. Under the constraints of supplying original engine oils for imported vehicles and tractors, the use of non-genuine lubricants has become a critical issue. The oil degradation process in this context is under-investigated. Existing recommendations from equipment and oil manufacturers often lack consistency. The absence of clear methods and standards for used oil assessment in the Russian Federation leads to management errors, emergency breakdowns and unplanned downtime. The study objective was to develop a methodology for calculating the resource potential of automotive and tractor engine oils. Russian national standards (GOST 33159-2021, GOST 34242-2017, GOST 1461-2023) and an international standard ASTM D5185 (inductively coupled plasma atomic emission spectrometry, ICP-AES) were reviewed and compared. Each method was evaluated for its capability to determine wear debris, contaminants and additives. The study used a thermodynamic approach (entropy production) and an S-shaped degradation curve. The results reveal that GOST 33159-2021 measures only the total content of insoluble substances without elemental analysis. GOST 34242-2017 determines only nickel, vanadium, and iron, which is insufficient for comprehensive diagnostics. ASTM D5185 covers 22 elements, including critical wear indicators, as well as all major additives. Furthermore, ASTM D5185 analysis requires only a few minutes. The change of oil condition followed an S-shaped curve with three characteristic points: onset of noticeable degradation changes (A), allowable limit (B) and critical state (C). The remaining useful life was determined by the width of the A-B interval. Application of ASTM D5185, in contrast to Russian standards, allows for simultaneous monitoring of wear elements and contaminants, tracking the concentration change of three types of additives over time, and constructing the trend lines to predict remaining useful life. The Russian regulatory framework, however, does not cover these requirements, hindering inter-laboratory data harmonization. Therefore, the ASTM D5185 standard is the most suitable method for determining the remaining useful life of engine oils in service. To introduce the methodology in industrial practice, the national standards should be updated to include elemental analysis requirements aligned with the scope of ASTM D5185.

***Keywords**:* lubricating oils, remaining useful life (RUL), maintenance, operating conditions, automotive equipment

For citation: Yakimenko I. Y., Khakimov R. T. Defining a testing methodology to characterize the degradation process for used engine oils. AgroEcoEngineering. 2026;3(128):71-81 (In Russ.) https://doi.org/ 10.24412/2713-2641-2026-3128-71-80

Введение. Качество используемого моторного масла напрямую влияет на экономичность, долговечность и безотказность работы любого двигателя внутреннего сгорания. В большинстве случаев при проведении сельскохозяйственных полевых работ двигатели, установленные на технику, работают в тяжёлых условиях с максимальной нагрузкой, что запускает необратимые процессы в моторном масле, в результате это приводит к снижению его эксплуатационных свойств и требует его замены. Данный процесс называется деградацией моторного масла. На данный момент существуют две точки зрения по поводу периодичности его замены [1]. Периодичность и межсервисный интервал по данным одних исследователей зависит от накопления в моторном масле продуктов износа, срабатывания присадок, образования шламов и сажи в результате неполного сгорания топлива, а также карбонизации масел, отфильтровав которые есть возможность восстановить исходные его параметры. Другая часть научного мира связывает процесс деградации масла с изменением углеводородной структуры в результате окисления [2]. В результате чего

процедура многоуровневой фильтрации и добавления присадок не может полностью восстановить характеристики и свойства моторного масла. Во многом это определяется тем, что единого подхода к оценке критических состояний масел нет, как нет и точных данных о влиянии межсервисных интервалов замены моторного масла на техническое состояние двигателя и срок его службы. В результате чего важное значение в организации системы планово-предупредительного и текущего ремонта на сельскохозяйственных предприятиях будет иметь методика определения оптимальных сроков службы моторных масел. Если рассматривать моторное масло как элемент конструкции двигателя, то надёжность его работы и срок службы можно интерпретировать через показатели состояния проб образцов отобранного моторного масла [3]. Межсервисные интервалы, рекомендованные производителями, основаны на тестовых лабораторных испытаниях двигателя при определённых нагрузках, и, зачастую, в регламентах прописывают, что изменение периодичности зависит только от качества использованного топлива, но не охватывают все возможные условия работы, а также возможность использования неоригинальных масел одной спецификации. В результате чего часто происходит замена моторного масла не в тот момент, когда оно потеряло свои свойства, а значительно раньше, как менее негативный вариант развития ситуации, или позже, как более негативный [4, 5], когда в двигателе начинают происходить необратимые изменения. Большинство производителей техники и смазочных материалов имеют разработанные схемы проведения анализов масел с аварийными показателями по износу узлов и агрегатов, а также требования к состоянию использования. Собственные программы, выработанные за многие годы мониторинга, имеются у таких мировых производителей как Caterpillar, Cummins, Petro-Canada, Chevron и др.

Зарубежные производители моторных масел Shell Care, Everlub Petronas, Caterpillar SOS и Cummins Lube Analyses дополнительно имеют свои ограничения и допуски по предельным значениям их параметров эксплуатационных свойств. Основная проблема заключается в том, что зачастую выбраковочные значения отличаются друг от друга, поэтому очень сложно подобрать данные значения при проведении анализа согласно классификациям европейских и американских производителей.

Открытым также остаётся вопрос об использовании неоригинальных масел российского производства, которые подходят по спецификации и классификации и имеют соответствующие допуски.

Цель исследования – разработка методологии расчёта ресурсного потенциала автотракторных моторных масел.

Материалы и методы. В работе были рассмотрены ГОСТы и стандарты ASTM по нефти и нефтяным продуктам.

Проблема заключается в том, что в стране отсутствует чёткая методика проведения испытаний образцов отработанных моторных масел для автотракторных двигателей. Каждая лаборатория, занимающаяся отбором проб и проведением анализов, проводит работы согласно тому оборудованию, что есть в наличии и, соответственно, той методологии, что данное оборудование может предоставить. В результате чего невозможно правильно сопоставить результаты, полученные из двух лабораторий, для одного образца отобранного масла. В связи с этим отсутствует возможность определения ресурсного потенциала моторных масел в процессе их эксплуатации.

Под ресурсным потенциалом принимается максимальное количество полезного времени эксплуатации моторного масла.

Моторное масло может поглотить без изменения своих свойств ограниченное количество загрязнений. Основным критерием для выбора интервала замены моторного масла является соотношение между расходом топлива и загрязнением моторного масла. Каждый производитель как и каждая лаборатория при проведении испытаний смазочных материалов ссылается на определённые стандарты, разработанные для класса моторного масла. Общий анализ литературы и стандартов, описывающих критические показатели, на

которых базируется оценка образцов моторного масла для автотракторных двигателей внутреннего сгорания, также не даёт однозначного ответа, какие параметры следует называть критическими – каждый производитель предъявляет свои требования. При отсутствии информации и выстроенной правильной системы отбора проб при проведении тестовых испытаний на использование неоригинальных масел становится затруднительным, ввиду невозможности прогнозирования и контроля процессов, протекающих в системе «двигатель – моторное масло».

Важную роль в определении состояния отработанного моторного масла во время его эксплуатации являются следующие факторы [6]:

- наличие индикаторов износа и элементов загрязнения;
- изменения, связанные с протеканием химических реакций;
- изменение физических свойств.

Наличие индикаторов износа в образцах отработанных масел имеет большое значение в определении правильности эксплуатации двигателя внутреннего сгорания, и предотвращения внеплановых простоев техники из-за аварийного отказа [7-9]. Следовательно, контроль содержания в пробах отработанного масла таких элементов как медь, железо, хром, алюминий, свинец, а также других продуктов работы триботехнических пар в системе «двигатель – моторное масло» играет важную роль для процесса контроля деградации моторных масел. Для определения наличия нерастворимых элементов в отработанных используемых маслах используется ГОСТ 33159-2021[35], который предусматривает определение содержания нерастворимых мелкодисперсных веществ, находящихся во взвешенном состоянии в пробе отработанного масла методом добавления коагулянта и последующего центрифугирования, промывки и сушки. При проведении испытаний по данному ГОСТу регистрация нерастворимых веществ производится в процентах.

Основным недостатком данного метода является невозможность определения поэлементного состава нерастворимых веществ, находящихся в пробе отработанного масла, что не даёт возможности определить, являются ли данные вещества элементами износа или элементами загрязнения, попавшими извне. Далее, отсутствует возможность определения их количественного состава и превалирующего количества одного из элементов. В результате чего данный ГОСТ 33159-2021 невозможно отнести к методу ранней диагностики моторного масла и системы «двигатель–моторное масло» ввиду его слабой информативности.

В нормативной базе также присутствует ГОСТ 34242-2017[36] «Определение никеля, ванадия и железа методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой», дающий возможность контроля содержания трех элементов износа двигателя внутреннего сгорания. Исходя из вышесказанного, ни один из отечественных ГОСТов не даёт полного отчёта о количественном поэлементном содержании нерастворимых веществ в пробе отработанного масла. ГОСТ 33159-2021 предусматривает определение содержания нерастворимых веществ в маслах, содержащих моющие присадки, но не может дать поэлементный количественный анализ, а ГОСТ 34242-2017 даёт поэлементный количественный анализ только трех элементов износа, причём определение элемента никеля для анализа не требуется.

Второй проблемой для контроля деградации моторного масла в процессе его эксплуатации является определение качества работы присадок [10]. Присадки применяются для улучшения и сохранения базовых свойств моторных масел, но даже при одной спецификации качественный и количественный состав может быть разным [11] (таблица 1).

[35] ГОСТ 33159-2021. Масла смазочные отработанные. Определение содержания нерастворимых веществ [Электронный ресурс] URL: https://docs.cntd.ru/document/1200181169 (09.06.2026)

[36] ГОСТ 34242-2017. Нефть и нефтепродукты. Определение никеля, ванадия и железа методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. [Электронный ресурс] URL: https://docs.cntd.ru/document/1200156913 (09.06.2026)

Таблица 1. Присадки базового масла и их применимость
Table 1. Base oil additives and their applicability

Элементы	Количество, ppm	Применимость
Кальций	400 - 3800	Детергентные присадки
Магний	0 - 1500	Детергентные присадки
Цинк	1300	Триботехническая присадка
Фосфор	1000	Триботехническая присадка и антиоксидант
Барий	0-100	Триботехническая присадка, детергент
Бор	0 - 800	Дисперирующая присадка

Основным примером могут стать детергентно-диспергирующие присадки, резкое падение значений которых означает потерю свойств используемого масла. Обращаясь к нормативной документации, можно утверждать, что в ней отсутствует ГОСТ по определению наличия детергентных, диспергирующих и триботехнических присадок в образцах отработанного моторного масла. ГОСТ 1461-2023[37] «Нефть и нефтепродукты. Метод определения зольности» не распространяется на отработанные масла, присадки и смазки. В результате чего нет возможности выстроить единую систему контроля, основанную на нормативной документации. Обращаясь к зарубежной методологии и опыту проведения анализов образцов отработанного моторного масла на практических испытаниях, определено, что стандарт ASTM D5185[38] «Метод определения элементов в отработанных и неиспользованных смазочных маслах и базовых маслах атомно-эмиссионной спектрометрией с индуктивно связанной плазмой» является ссылкой для нормативной базы документа ГОСТ 34242-2017 «Определение никеля, ванадия и железа методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой».

При сравнении данных, представленных в таблице 2, видно, что ГОСТ 34242-2017 и ГОСТ 33159-2021 не покрывают потребностей при проведении испытаний образцов отработанного масла.

Таблица 2. Сравнение методов испытаний
Table 2. Comparing the testing methods

Химический элемент	Требуемый диапазон обнаружения элементов, mg/kg (ppm)	Метод испытаний		
Индикаторы износа и загрязнений		ASTM D5158	ГОСТ 34242-2017	ГОСТ 33159-2021
Алюминий, Al	6–40	✓	—	—
Хром, Cr	40–9000	✓	—	—
Медь, Cu	2–160	✓	—	—
Железо, Fe	2–140	✓	✓	—
Свинец, Pb	10–160	✓	—	—

[37] ГОСТ 1461-2023. Нефть и нефтепродукты. Метод определения зольности. [Электронный ресурс] URL: https://docs.cntd.ru/document/1302181146 (09.06.2026)

[38] ASTM D5185-23. Standard Test Method for Multielement Determination of Used and Unused Lubricating Oils and Base Oils by Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry (ICP-AES). West Conshohocken, PA, USA: ASTM International. 2023. [Электронный ресурс] URL: https://store.astm.org/d5185-18.html (09.06.2026)

Молибден, Mo	5–200	✓	—	—
Никель, Ni	5–40	✓	✓	—
Серебро, Ag	0.5–50	✓	—	—
Сера, S	900–6000	✓	—	—
Олово, Sn	10–40	✓	—	—
Титан, Ti	5–40	✓	—	—
Ванадий, V	1–50	✓	✓	—
Присадки				
Барий, Ba	0,5 - 4	✓	—	—
Бор, B	4 – 30	✓	—	—
Кальций, Ca	40–9000	✓	—	—
Магний, Mg	5–700	✓	—	—
Калий, Ka	40–1200	✓	—	—
Кремний, Si	8–50	✓	—	—
Натрий, Na	7–70	✓	—	—
Цинк, Zn	60–1600	✓	—	—
Фосфор, P	10 -1000	✓	—	—

Основным элементом, необходимым для контроля, является железо, высокая концентрация которого указывает на высокий уровень износа триботехнических пар или на необратимые процессы, возникшие в двигателе, вызванные неправильным подбором смазочного материала или некорректной эксплуатацией агрегата. Эти данные возможно получить при выборе любого метода испытаний. При проведении испытания по ГОСТ невозможно отследить состояние присадок, нет возможности оценить качество эксплуатационных свойств моторного масла и работы двигателя в целом. Исходя из данных, отражённых в таблице 2, в отличие от ГОСТ, метод испытания ASTM имеет возможность быстрого определения химических элементов, как в отработанных, так и в неиспользованных смазочных и базовых маслах, и подходит для обнаружения большинства элементов, находящихся в диапазоне низких мг/кг. Время проведения данного тестирования занимает несколько минут. Также есть возможность разделить элементы по группам. В первую группу будут входить элементы, присутствие которых будет указывать на наличие нормального или повышенного износа в двигателе. Во вторую группу элементов могут входить элементы загрязнений, попавших в систему извне в результате неправильной эксплуатации, обслуживания или поломки оборудования, которые могут привести к повышенному износу двигателя.

Исходя из данных в таблице 3, представленный метод ASTM подходит для определения количественного содержания основных типов присадок, таких как калий, магний цинк и фосфор, что даёт возможность в дальнейшем при отборе проб через определённое время в период работы системы «моторное масло – двигатель» определить линию тренда для этих элементов, так как есть возможность определить поэлементный количественный анализ нерастворимых веществ. На основании данных можно составить графики с линий тренда для отслеживания изменения количественного и качественного состава нерастворимых элементов.

Таблица 3. Присадки базового масла и диапазоны обнаружения атомно-эмиссионной спектрометрией с индуктивно связанной плазмой
Table 3. Base oil additives and the element detection range by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry

Химический элемент	Диапазон обнаружения элементов, mg/kg (ppm)	Количественное содержание присадок в моторных маслах, mg/kg (ppm)
Барий, Ba	0,5 - 4	0-100
Бор, B	4 – 30	0 - 800
Кальций, Ca	40–9000	400 - 3800
Магний, Mg	5–700	0 - 1500
Цинк, Zn	60–1600	1300
Фосфор, P	20 -1200	1000

Изменение состояния масел во времени τ, при выполнении ими своих функций, можно охарактеризовать производством энтропии S, определяющимся соотношением

$$\frac{\partial S}{\partial \tau} = \frac{\nu A}{T}, \quad (1)$$

где: ν – скорость химической реакции; A – сродство реакции; T – температура.

Время протекания химической реакции связано с её полнотой превращения ξ соотношением:

$$\nu \approx \frac{\partial \xi}{\partial \tau}, \quad (2)$$

Значение ξ изменяется от 0 до 1, если ξ = 0 соответствует исходному состоянию масла, а ξ = 1 – состоянию, к моменту реализации которого в масле произошли все возможные превращения. Вследствие чего, как показано на рисунке, изменения состояния моторного масла можно описать S-образной кривой, имеющей характерные точки A, B и C применительно к состоянию масла критическими. После точки A начинаются заметные превращения, временной интервал процесса изменения состояния моторного масла от точки A до точки B можно считать допустимым. От точки B до точки C – недопустимым. В первом интервале есть возможность регламентировать максимально допустимые лимиты. Во втором диапазоне нормируются критические значения. Данная интерпретация изменения состояния моторного масла позволяет решить проблему нормирования допустимых критических показателей и изменения их во времени, тем самым вычислить ресурсный потенциал моторного масла, следует предположить, чем уже будет кривая по оси «X», тем меньше ресурсный потенциал испытуемого моторного масла.

Следовательно, ресурсный потенциал характеризуется процессом деградации свойств моторного масла во временном промежутке в результате протекания химических

процессов, изменения физических свойств и накопления элементов загрязнения и износа до момента потери эксплуатационных характеристик.

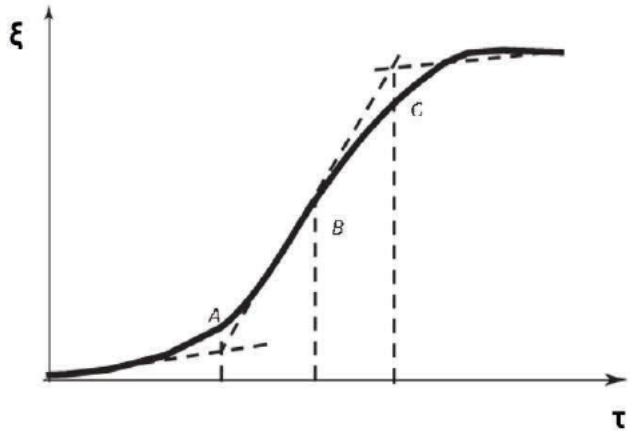


Рис. Процесс деградации моторного масла
Figure. The oil aging process

Выводы. Используемый метод ASTM D5185 – «Метод определения элементов в отработанных и неиспользованных смазочных маслах и базовых маслах атомно-эмиссионной спектрометрией с индуктивно связанной плазмой» позволяет контролировать состояние моторного масла при максимальных нагрузках двигателя в процессе эксплуатации автотракторной техники в полевых условиях, при этом используя данный метод можем отслеживать качественное и количественное содержание трех типов присадок, что является основной в правильности подбора смазочного материала, а так же отслеживать изменения, происходящие с ними в процессе работы двигателя, что даёт возможность оценить его ресурсный потенциал.

При планировании эксперимента в определении элементов износа и загрязнений, а также состоянии присадок, необходимо придерживаться ASTM D5185 «Метод определения элементов в отработанных и неиспользованных смазочных маслах и базовых маслах атомно-эмиссионной спектрометрией с индуктивно связанной плазмой». На основе полученных данных будет возможность построить графики изменения состояния присадок и накопления элементов загрязнений за определённый временной отрезок, что на практике сможет подтвердить данные зависимости от времени эксплуатации моторного масла.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Двойрис Л.И., Бондарев В.К., Гиндин Л.М. Исследование факторов, влияющих на расход и старение моторных масел // Сборник Московского Дома научно-технической пропаганды имени Ф. Э. Дзержинского. М. 1979. С. 47-54.

2. Нигматуллин Р.Г., Нигматуллин В.Р., Нигматуллин И.Р. Диагностика ДВС по анализу моторного масла. Уфа: ГУП РБ «Уфимский полиграфкомбинат». 2011. 297 с.

3. Головных И.М., Носова Е.В. Замена моторного масла по фактическому состоянию // Автомобильная промышленность. 1998. № 1. С. 23-24.

4. Замалдинов М.М., Салахутдинов И.Р., Хакимов Р.Т. Загрязнение минерального масла и влияние типа очистителя на износ двигателя // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2019. № 57. С. 141-148. https://doi.org/10.24411/2078-1318-2019-14141

5. Arabyan, S.G., Pimenov, A.M., Chtchyan, G.O., Belyanchikov G. P., Bashaev V. E., Khiger V. F. Method for rating detergent properties of oils for tractor diesels // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. 1989. Vol. 25. P. 513-515 https://doi.org/10.1007/BF00726011

6. Alimova Z. Kh., Siddikov F. The aging process of motor oils during operation // European International Journal of Multidisciplinary Research and Management Studies. 2022. Vol. 2 (6). P. 166-169. https://inlibrary.uz/index.php/eijmrms/article/view/23500/24347

7. Bennett S. Automatic on-line fluid monitoring // Industrial Lubrication and Tribology. 1994. Vol. 46. P. 8-9. https://doi.org/10.1108/00368799410781124

8. Якименко И.Ю., Хакимов Р.Т. Основные проблемы в проведении испытаний образцов отработанных моторных масел // Чтения академика В.Н. Болтинского (Москва, 22-23 января 2025 г.). М.: Сам Полиграфист. 2025. С. 40-44.

9. Якименко И.Ю. Хакимов, Р.Т. Определение ресурсного потенциала моторного масла в процессе его эксплуатации // Чтения академика В.Н. Болтинского (Москва, 22-23 января 2025 г.). М.: Сам Полиграфист. 2025. С. 88-92.

10. Порохня А.А., Якименко И.Ю. Датчики контроля состояния смазочных материалов в режиме реального времени // Грузовик: транспортный комплекс, спецтехника. 2023. № 3. С. 24-31. https://doi.org/10.36652/1684-1298-2023-3-24-31

11. Porokhnya A.A., Yakimenko I.U. Oil conditioning sensors for online heavy-duty engine health monitoring based on the control of a limited number of parameters // SPIE Conference Proceedings. 2022. Vol. 12296. https://doi.org/10.1117/12.2643075

REFERENCES

1. Dvoiris L.I., Bondarev V.K., Gindin L.M. Investigation of factors affecting the consumption and aging of motor oils. In: Collection of the Moscow House of Scientific and Technical Propaganda named after F. E. Dzerzhinsky. Moscow. 1979: 47-54. (In Russ.)

2. Nigmatullin R.G., Nigmatullin V.R., Nigmatullin I.R. Internal combustion engine diagnostics by engine oil analysis. Ufa: Ufimskiy poligrafkombinat. 2011. 297 p. (In Russ.)

3. Golovnykh I.M., Nosova E.V. Replacement of engine oil according to the actual condition. Avtomobil'naya promyshlennost' = Automotive Industry. 1998; 1:23-24. (In Russ.)

4. Zamaldinov M.M., Salakhutdinov I.R., Khakimov R.T. Contamination of mineral oil and the effect of the type of cleaner on engine wear. Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Izvestiya Saint-Petersburg State Agrarian University. 2019;57:141-148. (In Russ.) https://doi.org/10.24411/2078-1318-2019-14141

5. Arabyan, S.G., Pimenov, A.M., Chtchyan, G.O., Belyanchikov G. P., Bashaev V. E., Khiger V. F. Method for rating detergent properties of oils for tractor diesels. Chemistry and Technology of Fuels and Oils. 1989;25: 513-515 (In Eng.) https://doi.org/10.1007/BF00726011

6. Alimova Z. Kh., Siddikov F. The aging process of motor oils during operation // European International Journal of Multidisciplinary Research and Management Studies. 2022; 2 (6): 166-169. (In Eng.) https://inlibrary.uz/index.php/eijmrms/article/view/23500/24347

7. Bennett S. Automatic on-line fluid monitoring. Industrial Lubrication and Tribology. 1994; 46: 8-9. (In Eng.) https://doi.org/10.1108/00368799410781124

8. Yakimenko I.Yu., Khakimov R.T. The main problems in testing samples of used motor oils. In: Readings of Academician V.N. Boltinsky (Moscow, January 22-23, 2025). Moscow: Sam Poligrafist Publ. 2025: 40-44. (In Russ.)

9. Yakimenko I.Yu., Khakimov, R.T. Determination of the resource potential of engine oil during its operation. In: Readings of Academician V.N. Boltinsky (Moscow, January 22-23, 2025). Moscow: Sam Poligrafist Publ. 2025: 88-92. (In Russ.)

10. Porohnya A.A., Yakimenko I.Yu. Real-time lubricant monitoring sensors. Gruzovik: transportnyj kompleks, spetstekhnika = Truck: transport complex, special machines. 2023;(3):24-31. (In Russ.) https://doi.org/10.36652/1684-1298-2023-3-24-31

11. Porokhnya A.A., Yakimenko I.U. Oil conditioning sensors for online heavy-duty engine health monitoring based on the control of a limited number of parameters. SPIE Conference Proceedings. 2022;12296. https://doi.org/10.1117/12.2643075

Об авторах	About the authors
Хакимов Рамиль Тагирович, д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Автомобили, тракторы и технический сервис» Санкт-Петербургского государственного аграрного университета 196601, Российская Федерация г. Санкт-Петербург-Пушкин, Петербургское шоссе, 2 ORCID: 0000-0003-4858-3586; eLibrary SPIN: 7784-6537; e-mail: haki7 @mail.ru	**Ramil T. Khakimov**, DSc (Engineering), Associate Professor, Head of the Department "Cars, Tractors and Technical Service", Saint Petersburg State Agrarian University 196601, Saint Petersburg-Pushkin, Peterburgskoje Shosse, 2, Russian Federation ORCID: 0000-0003-4858-3586; eLibrary SPIN: 7784-6537; e-mail: haki7@mail.ru
Якименко Илья Юрьевич, аспирант, Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, 196601, Российская Федерация г. Санкт-Петербург-Пушкин, Петербургское шоссе, 2 ORCID: 0000-0003-4256-9425; e-mail: Y@kimenko.ru	**Ilya Yu. Yakimenko**, PhD student, Saint Petersburg State Agrarian University 196601, Russian Federation, Saint Petersburg-Pushkin, Peterburgskoje Shosse, 2 ORCID: 0000-0003-4256-9425; e-mail: Y@kimenko.ru
Заявленный вклад авторов Р.Т. Хакимов – руководство исследованием, проведение критического анализа материалов, расчётов и выводов; И.Ю. Якименко – методология, анализ полученных данных и подготовка выводов, написание текста.	**The stated authors' contribution** R.T. Khakimov – scientific guidance of the study, critical analysis of materials, calculations and conclusions. I.Yu. Yakimenko – methodology, data analysis, preparation of conclusions, writing the text.
Конфликт интересов Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов	**Conflict of interest** The authors declare that there is no conflict of interest
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи к публикации.	The authors have read and approved the final version of the manuscript for publication.
Статья поступила в редакцию: 12.02.2026	**Received:** 12.02.2026
Одобрена после рецензирования: 17.07.2026	**Approved after reviewing:** 17.07.2026
Принята к публикации: 11.09.2026	**Accepted for publication:** 11.09.2026

РАЗДЕЛ 2. ЭКОЛОГИЯ И ТЕХНОЛОГИИ В ЖИВОТНОВОДСТВЕ

Обзорная статья
УДК 631.248.4. DOI 10.24412/2713-2641-2026-3128-81-90

АНАЛИЗ МЕТОДОВ СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ АММИАКА, ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ И ЗАПАХА ИЗ НАВОЗОХРАНИЛИЩ

Александр Юрьевич Брюханов, Владимир Иванович Земцев ✉

Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) - филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, Санкт-Петербург, Россия

vova.zemtsev.00@mail.ru

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена необходимостью снижения выбросов аммиака, парниковых газов и запахов от открытых навозохранилищ в Ленинградской области. Цель – на основе системного анализа определить наиболее эффективные и технологически реализуемые методы снижения выбросов для цилиндрических навозохранилищ. Методы. Теоретико-аналитическое исследование: сбор и систематизация научных публикаций преимущественно за 2019-2025 гг. с привлечением отдельных фундаментальных работ более раннего периода, сравнительный анализ эмпирических данных, факторная систематизация методов по типу воздействия. Результаты. Установлено, что главными факторами пиковых выбросов являются повышение температуры навозной массы свыше 20 °С, рост pH выше 7,0 и перемешивание. Наиболее высокую теоретическую эффективность (90-98 %) показывает комбинация плавающих покрытий с подкислением. Плавающие покрытия снижают фоновую эмиссию аммиака на 60-90 %, метана – до 80 %, подкисление снижает эмиссию аммиака на 65-75 %. Перспективным оперативным методом для подавления пиковых выбросов является биопена, обеспечивающая снижение концентрации аммиака и запахов на 70-90 %. Биопрепараты и биоуголь обеспечивают снижение на 40-80 %, но требуют учёта условий эксплуатации. Обсуждение. Оперативные меры (биопена, биоплёнка) наиболее эффективны для подавления пиковых выбросов и могут гибко комбинироваться с химическими и биологическими методами. Выводы. Для Ленинградской области оптимальным является использование биопены или биоплёнки перед перемешиванием в комбинации с подкислением или биодобавками.

Ключевые слова: навозохранилище, аммиак, запах, подкисление, плавающее покрытие, биоуголь, биопена, снижение выбросов.

Для цитирования: Брюханов А.Ю, Земцев В.И. Анализ методов снижения выбросов аммиака, парниковых газов и запаха из навозохранилищ // АгроЭкоИнженерия. 2026. № 3(128). С. 81- 91 https://doi.org/ 10.24412/2713-2641-2026-3128-81-90

Review Article
Universal Decimal Code 631.248.4.

REVIEW OF METHODS FOR REDUCING AMMONIA, GREENHOUSE GASES, AND ODOR EMISSIONS FROM MANURE STORAGES

Aleksandr Yu. Briukhanov, Vladimir I. Zemtsev✉
Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) – branch of FSAC VIM, Saint Petersburg, Russia

vova.zemtsev.00@mail.ru

Abstract. Reducing ammonia, greenhouse gases, and odor emissions from open manure storages in the Leningrad Region is an urgent environmental task. Using systems analysis, the study aimed to identify the most effective and technologically feasible methods for reducing emissions from cylindrical manure storages. The study comprised a literature review (2019-2025) including some earlier fundamental works, comparative analysis of empirical data, and factor-based classification of methods by their action mechanism. The results indicate that the main factors causing peak emissions are an increase in manure temperature above 20 °C, a pH rise above 7.0, and mechanical mixing. A combination of floating covers with acidification demonstrates the highest theoretical efficiency of 90-98%. Specifically, floating covers reduce background ammonia emissions by 60-90% and methane by up to 80% while acidification lowers emissions by 65-75%. Furthermore, biofoam is a promising operational method for suppressing peak emissions, decreasing ammonia and odor concentrations by 70-90%. Biological additives and biochar achieve a 40-80% reduction, but require specific operating conditions. Operational measures, particularly biofoam and biofilm, are the most effective for suppressing peak emissions and can be flexibly integrated with chemical and biological treatments. For the Leningrad Region, the optimal approach involves applying biofoam or biofilm prior to mixing, combined with acidification or biological additives.

Keywords: manure storage facility, ammonia, odor, acidification, floating cover, biochar, biofoam, emission reduction

For citation: Briukhanov A.Yu., Zemtsev V.I. Review of methods for reducing ammonia, greenhouse gases, and odor emissions from manure storages. AgroEcoEngineering. 2026;3(128):81-91 (In Russ.) https://doi.org/ 10.24412/2713-2641-2026-3128-81-90

Введение. Эмиссия аммиака и неприятных запахов из открытых навозохранилищ создают серьёзные экологические и социально-экономические риски, напрямую влияя на состояние атмосферного воздуха и качество жизни в близлежащих населённых пунктах. По данным Европейского агентства по окружающей среде (EEA, 2024), на долю сельского хозяйства приходится более 90 % общих выбросов аммиака (NH_3) в Европейском союзе, при этом около половины указанного объёма выбросов связано с системами хранения и обработки навоза[39]. В Российской Федерации, и в частности в Ленинградской области, данная проблема осложняется сочетанием высокой влажности, нестабильности погодных

[39] European Environment Agency. Ammonia emissions from agriculture – EEA indicator assessment 2024. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2024. [Электронный ресурс] URL: https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/ammonia-emissions-from-agriculture (дата обращения 14.09.2026)

условий и непредсказуемости периодических потеплений, что приводит к интенсивным потерям азота и пиковым выбросам вредных веществ и запахов во время перемешивания навозных масс. Ситуация усугубляется повсеместным использованием устаревших технологий хранения навоза крупного рогатого скота (КРС), таких как открытые лагуны без какого-либо покрытия или системы биологической обработки, что не обеспечивает эффективного подавления эмиссии газов. Современные инженерные решения направлены на создание барьеров для испарения, химическое связывание аммонийного азота и стабилизацию органических соединений. В мировой практике разработан широкий спектр технологий от органических и пластиковых покрытий до микробиологических и химических методов стабилизации. Однако эффективность большинства подходов зависит от климатических условий, размеров резервуаров, финансовых возможностей хозяйства и структуры навоза, что обуславливает необходимость региональной адаптации и выбора оптимальных решений для конкретных условий эксплуатации.

Цель исследования – на основе системного анализа определить наиболее эффективные и технологически реализуемые методы снижения выбросов аммиака (NH_3), сероводорода (H_2S), метана (CH_4) и запахов для цилиндрических навозохранилищ в условиях Ленинградской области.

Материалы и методы исследования. Исследование носит теоретико-аналитический характер и основано на анализе отечественных и зарубежных научных публикаций, посвящённых проблемам снижения выбросов аммиака, метана и пахучих соединений при хранении жидкого навоза. В обзор включены работы, опубликованные преимущественно в период с 2019 по 2025 гг., а также отдельные более ранние фундаментальные исследования (2003-2017 гг.), характеризующие физико-химические механизмы эмиссий газов и методы их регулирования.

Работа включает три ключевых этапа:

1. Сбор и систематизация данных – отбор и структурирование публикаций по направлениям: физические, химические, биологические и комбинированные методы снижения выбросов.
2. Аналитическая обработка – выявление закономерностей, сопоставление результатов исследований различных авторов и оценка эффективности подходов по показателям снижения NH_3, CH_4 и запахов.
3. Обобщение и формулирование выводов – анализ практических рекомендаций и классификация методов по уровню затрат и технологической реализуемости.

Методология исследования включает сравнительный анализ (сопоставление эмпирических данных из разных источников), факторную систематизацию (группировку методов по типу воздействия), а также визуализацию и классификацию данных в виде обобщённой схемы, отражающей эффективность и теоретическую обоснованность каждого метода.

Результаты исследования. Процессы образования и выделения аммиака, сероводорода, метана и летучих органических соединений при хранении навоза представляют собой сложные биохимические реакции, интенсивность которых определяется физическими и химическими параметрами среды: температурой, pH, концентрацией органического азота и доступом кислорода. Активность микробиоты (аммонификаторов и

метаногенов[40]) в открытых навозохранилищах сохраняется в широком диапазоне температур, обусловливая постоянные потери азота и эмиссию пахучих веществ [1].

Даже при применении базовых методов контроля (регулирование влажности, частичное перекрытие поверхности) процессы выделения газов не прекращаются полностью: биохимическое разложение органики продолжается, а выделение NH_3 усиливается при нагревании навозной массы выше 20 °C [2]. Таким образом, снижение эмиссий возможно только при создании барьерных или ингибирующих условий для газообмена и микробной активности.

Одним из определяющих факторов, влияющих на интенсивность выделения аммиака из навозных масс, является pH среды. Согласно результатам исследований, при повышении pH выше 7 усиливается переход ионов аммония (NH_4^+) в газообразную форму NH_3, что приводит к ускоренным потерям азота и усилению запаха [3, 4]. Метод подкисления навоза до уровня pH ≈ 5,5-6,0 показал высокую эффективность в снижении аммиачных выбросов. В отдельных экспериментах эмиссия NH_3 сокращалась на 65-75 % [5, 6]. Кроме того, кислотная стабилизация субстрата снижала активность метаногенных архей и уменьшала образование CH_4 [5,16].

Температурный фактор также оказывает существенное влияние: при повышении температуры свыше 20 °C отмечается усиление микробной активности и интенсификация уреазного гидролиза, что увеличивает скорость выделения NH_3 [4,5]. Данные согласуются с наблюдениями при хранении навоза в тёплое время года, когда фиксируется пиковая эмиссия аммиака и запаха [7].

Среди физических методов наиболее перспективными являются покрытия, создающие барьер для газообмена между навозной массой и атмосферой. В ряде исследований установлено, что применение плавающих покрытий из керамзитовых шариков (LECA) или полимерных элементов (Hexa-cover) обеспечивает снижение выбросов NH_3 на ≈ 60-70 % и CH_4 до 80 %. Эффективность зависит от толщины и плотности слоя покрытия, а также от условий эксплуатации [8,9].

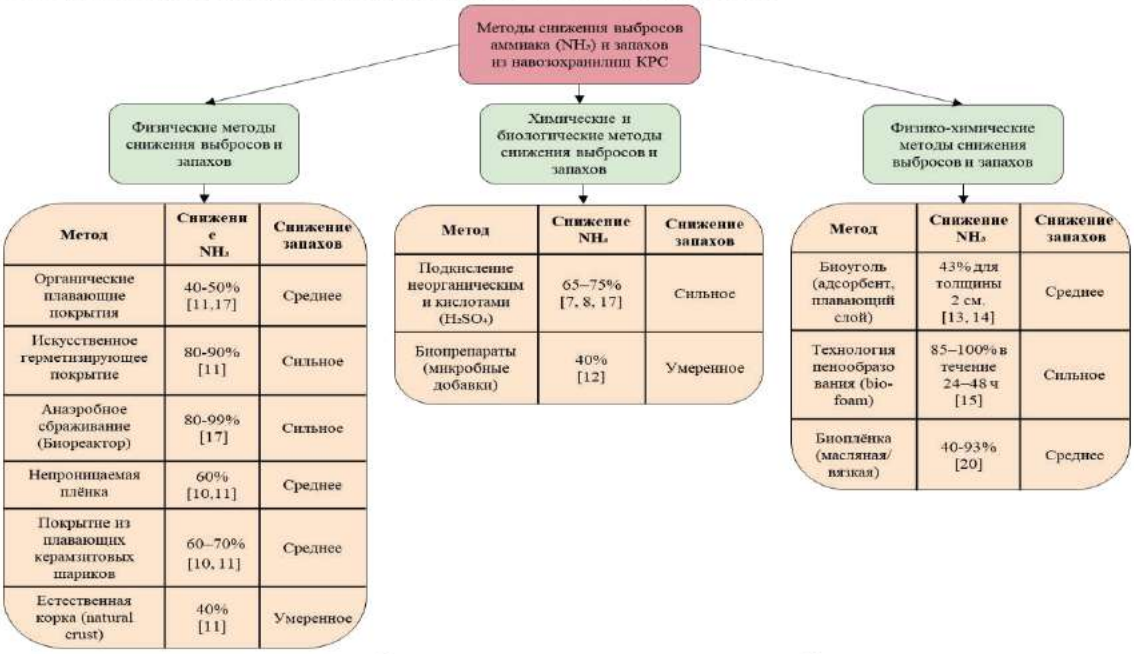
Эмиссию аммиака из навоза эффективно снижают биологические методы, направленные на стимуляцию местной микрофлоры. Применение *Bacillus subtilis* способствует снижению выбросов NH_3 на 40%, главным образом за счет биостимуляции аэробных нитрифицирующих бактерий в навозе, а не за счет приживления самого интродуцента [10,17].

Биоуголь проявляет двойной эффект – адсорбирует аммиак и формирует дополнительный физический барьер. При толщине слоя около 2 см степень снижения NH_3 может достигать ≈ 75-80 % [11,12].

К числу оперативных мер, применяемых при пиковых выбросах (во время перемешивания или в жаркие дни), относится формирование биоплёнки либо нанесение биопены. По данным научных работ, такие методы способны снизить концентрацию NH_3 в приземном воздухе на 70-90 % за счёт ограничения диффузии и частичного поглощения газов пенообразующим слоем [13,14].

[40] Microflora of manure. Studfile. [Электронный ресурс] URL: https://studfile.net/preview/1839059/page:22/ (дата обращения 14.09.2026)

Результаты проведённого анализа обобщены в виде схемы классификации методов снижения выбросов NH_3 и запахов из навозохранилищ КРС (рисунок), отражающей механизмы воздействия и диапазоны достигаемой эффективности.



Метод	Снижение NH_3	Снижение запахов
Органические плавающие покрытия	40-50% [11,17]	Среднее
Искусственное герметизирующее покрытие	80-90% [11]	Сильное
Анаэробное сбраживание (Биореактор)	80-99% [17]	Сильное
Непроницаемая плёнка	60% [10,11]	Среднее
Покрытие из плавающих керамзитовых шариков	60–70% [10, 11]	Среднее
Естественная корка (natural crust)	40% [11]	Умеренное

Метод	Снижение NH_3	Снижение запахов
Подкисление неорганическим и кислотами (H_2SO_4)	65–75% [7, 8, 17]	Сильное
Биопрепараты (микробные добавки)	40% [12]	Умеренное

Метод	Снижение NH_3	Снижение запахов
Биоуголь (адсорбент, плавающий слой)	43% для толщины 2 см. [13, 14]	Среднее
Технология пенообразования (bio-foam)	85–100% в течение 24–48 ч [15]	Сильное
Биоплёнка (масляная/вязкая)	40-93% [20]	Среднее

Рисунок. Блок-схема классификации методов снижения выбросов NH_3 и запахов из навозохранилищ КРС

Figure. Block diagram of classification of methods for reducing NH_3 and odor emissions from cattle manure storages

Примечание: количественная оценка снижения запахов приведена в виде качественных показателей на основе анализа источников: [9, 10, 13, 14, 15, 18]. Шкала оценок: сильное снижение – 70-100 %, среднее – 40-70 %, умеренное – 20-40 %, низкое – 0-20 %.

Note: quantitative assessment of odor reduction is given as qualitative indicators based on the analysis of sources: [9, 10, 13, 14, 15, 18].

Scale of assessment: significant reduction – 70-100%, medium – 40-70%, moderate – 20-40%, low – 0-20%.

Обсуждение. Схема демонстрирует, что методы снижения выбросов аммиака и запахов различаются по механизму и области применения. Физические методы (например, покрытия) эффективно ограничивают фоновые выбросы, но часто требуют значительных капитальных затрат. Применение плавающих покрытий позволяет снизить выбросы метана до 80 %, а аммиака на 60-70 % [9]. Биореактор снижает не контролируемые выбросы метана на 80-99 % [15]. Более простые органические покрытия, такие как сено или солома, менее эффективны (снижение NH_3 на 40-50 %) и требуют частого обновления.

Химические и биологические методы воздействуют непосредственно на процессы образования аммиака. Например, подкисление навоза кислотами показывает высокую результативность, сокращая эмиссию NH_3 на 65-75 % и значительно подавляя образование метана до 97-99 % [5,6]. Химические добавки требуют точного контроля дозировки из-за рисков засоления будущих удобрений. Эффективность биопрепаратов может быть непостоянной и сильно зависеть от внешних условий (температуры, состава навоза).

Оперативные меры (например, применение пенообразующих агентов) предназначены в основном для подавления пиковых выбросов, возникающих при

перемешивании и высокой температуре, и обычно не применяются для борьбы с фоновой эмиссией. Ключевым преимуществом биопены является её высокая эффективность (снижение концентрации аммиака в воздухе на 70-90 %) и возможность гибкого применения непосредственно в моменты наибольшей эмиссии запахов. Исследования подтверждают эффективность пенных составов для подавления сероводорода, что расширяет область их применения для комплексного снижения запаха.

Важно отметить, что каждый из рассмотренных методов имеет свои ограничения. Для биоугля основными проблемами являются определение оптимальной дозы и поддержание его на поверхности, так как при намокании и погружении он может терять сорбционную способность. Решением может стать размещение биоугля в перфорированных контейнерах или на плавучих понтонах. Метод подкисление требует строгого соблюдения мер техники безопасности при работе с кислотами и контроля дозировки во избежание засоления будущих удобрений. Применение плавающих покрытий сопряжено с высокими капитальными затратами и технологической сложностью монтажа и обслуживания на существующих цилиндрических хранилищах большого диаметра, что ограничивает их широкое внедрение в текущих условиях. Оперативные меры, такие как биопена, также имеют недостатки: недостаточная изученность влияния сильного ветра и дождя на их устойчивость, а также малое количество практических исследований в реальных условиях.

Выбор оптимальной технологии должен учитывать не только эффективность, но и устойчивость к климатическим условиям региона, простоту внедрения, экономическую доступность и возможность сочетания методов. Для Ленинградской области наиболее эффективным способом является применение комбинации плавающих покрытий с подкислением или добавлением биологических ингибиторов, обеспечивающее высокую эффективность. Если рассматривать экономическую оправданность, перспективными вариантами могут оказаться физико-химические способы, такие как использование биопены или биоплёнок. С точки зрения применяемости для уже существующих хранилищ данные методы являются перспективными.

Выводы. 1. Проведённый анализ позволил систематизировать методы снижения выбросов аммиака, метана и запахов при хранении навоза КРС. Установлено, что пиковые выбросы возникают при перемешивании, повышении температуры навозной массы выше 20 °С и росте pH выше 7,0. Эти условия усиливают активность микрофлоры и переход аммония (NH_4^+) в летучую форму аммиака (NH_3), поэтому в такие периоды необходимо применение оперативных мер.

2. Для снижения эмиссии метана наиболее эффективны физические методы: плавающие покрытия уменьшают выбросы CH_4 до 80 %, биореакторы – на 80-99 %. Подкисление навоза также подавляет образование метана, но в первую очередь направлено на контроль аммиака и запахов: оно снижает эмиссию NH_3 на 67-75 % и стабилизирует состав навозной массы.

3. Биологические и физико-химические методы способствуют сохранению азота в навозе. Биоуголь и биопрепараты снижают выбросы NH_3 на 40-80 %, а оперативные меры (биоплёнка, биопена) – на 70-90 % при пиковых выбросах. Их главное преимущество – возможность гибко сочетаться с кислотами и биодобавками, что даёт синергетический эффект.

4. Плавающие покрытия эффективно снижают фоновую эмиссию (до 60-90 % для NH_3), устойчивы к погоде и долговечны, но требуют больших капитальных затрат и сложны

в монтаже на существующих цилиндрических хранилищах. Поэтому для условий Ленинградской области оптимальным вариантом является комбинирование оперативных мер (распыление биопены или биоплёнки перед перемешиванием) с подкислением или биодобавками. Такое сочетание обеспечивает снижение выбросов NH_3 и запахов до 90=98 % при пиковых выбросах и является наиболее экономически оправданным и технологически реализуемым решением для существующих навозохранилищ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Васильев Э. В., Папушин Э. А., Максимов Д. А., Шалавина Е.В., Матейчик С.Н. Алгоритм определения коэффициентов для расчета выбросов метана от систем сбора, хранения и использования навоза/помета // АгроЭкоИнженерия. 2024. № 1(118). С. 107-118. https://doi.org/10.24412/2713-2641-2024-1118-107-118 EDN: EEGSXP

2. Bleizgys R., Bajore V., Nainys R., Poškus A. Reduction of the livestock ammonia emission under aerobic treatment of manure // Polish Journal of Environmental Studies. 2013. Vol. 22 (1). P. 23-29. https://doi.org/10.1155/2013/825437

3. Kupper T., Häni C., Neftel A., Kincaid C., Bühler M., Amon B., VanderZaag A. Ammonia and greenhouse gas emissions from slurry storage-A review // Agriculture, Ecosystems & Environment. 2020. Vol. 300. P. 106963. https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106963

4. Васильев Э. В., Козлова Н. П. Эффективность использования азота - индикатор экологического воздействия на окружающую среду сельскохозяйственного предприятия // АгроЭкоИнженерия. 2023. № 2(115). С. 4-23. https://doi.org/10.24412/2713-2641-2023-2115-4-23 EDN: AVAZXS

5. Overmeyer V., Holtkamp F., Clemens J., Büscher W., Trimborn M. Acidification of slurry to reduce ammonia and methane emissions: Deployment of a retrofittable system in fattening pig barns .. Journal of Environmental Management. 2023. Vol. 331. P. 117263. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117263

6. Keskinen R., Termonen M., Luostarinen S., Räty M., Kaseva J., Joki-Tokola E. Slurry acidification outperformed injection as an ammonia emission-reducing technique in boreal grass cultivation // Nutrient Cycling in Agroecosystems. 2022. Vol. 122(2). P. 139-156. https://doi.org/10.1007/s10705-021-10190-1

7. Вторый В. Ф., Вторый С. В., Ковалев С. В. Оценка эмиссии климатически активных газов на молочной ферме КРС // АгроЭкоИнженерия. 2023. № 3(116). С. 124-136. https://doi.org/10.24412/2713-2641-2023-3116-124-135 EDN: WBSKPJ

8. Yan X., Wang S., Duan H., Li D., Cheng V., Zhang F. A review of mitigation technologies and management strategies for greenhouse gas and air pollutant emissions in livestock production // Journal of Environmental Management. 2024. Vol. 352. P. 120028. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120028

9. Bittman S., Dedina M., Howard C.M., Oenema O., Sutton M.A. (eds.) Reducing ammonia emissions: measures and actions. In: Options for Ammonia Mitigation: Guidance from the UNECE Task Force on Reactive Nitrogen. Edinburgh, UK: Centre for Ecology and Hydrology. 2014. P. 8-13. URL: https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/510206/1/N510206CR.pdf

10. Hwang O., Yun Y. M., Trabue S. Impact of Bacillus subtilis on manure solids, odor, and microbiome // Journal of Environmental Management. 2023. Vol. 333. P. 117390. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117390

11. Dougherty B., Gray M., Johnson M., Kleber M. Can biochar covers reduce emissions from manure lagoons while capturing nutrients? // Journal of Environmental Quality. 2017. Vol. 46, No. 3. P. 659-666. https://doi.org/10.2134/jeq2016.12.0478

12. Scotto di Perta E., Mautone A., Oliva M., Cervelli E., Pindozzi S. An effective biochar application for reducing nitrogen emissions from buffalo digestate storage tank // Applied Sciences. 2024. Vol. 14(15). P. 6456. https://doi.org/10.3390/app14156456

13. Gautam P., Kumar S., Dhal G.C., Kim K.-H., Pandey A., Karmakar S., Park J. Field application of bio-foam spray to reduce ammonia emission from ammonia-rich swine manure piles // Chemosphere. 2024. Vol. 349. P. 140756. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140756

14. Park J., Kang T., Heo Y., Lee K., Kim K., Lee K., Yoon S. Mitigation of ammonia and hydrogen sulfide emissions by stable aqueous foam-microbial media // Environmental Science & Technology. 2006. Vol. 40 (9). P. 3030-3035. https://doi.org/10.1021/es051810j

15. Dong H., Mangino J., McAllister T.A., Hatfield J.L., Johnson D.E., Lassey K.R., Aparecida de Lima M., Romanovskaya A. Mitigation technologies and practices for reducing CH_4 emissions from animal manure management. In: 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Hayama, Japan: IGES. 2022. Vol. 4. Chapter 10. URL: https://www.ccacoalition.org/sites/default/files/resources/2022_Mitigation-technologies-and-practices-for-reducing-CH4-emissions_CCAC.pdf

16. Romaniuk W., Barwicki Ja. Reduction of ammonia emission by slurry acidification and methane fermentation technology // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2017. №. 91. С. 164-175. EDN: YODUNZ

17. Шалавина Е. В., Васильев Э. В. Повышение экологической безопасности путем разработки технологического регламента переработки и использования побочной продукции животноводства // АгроЭкоИнженерия. 2023. № 1(114). С. 141-152. https://doi.org/10.24412/2713-2641-2023-1114-141-154 EDN: KABEKB

18. Portejoie S., Martinez J., Guiziou F., Coste C.M. Effect of covering pig slurry stores on the ammonia emission processes // Bioresource Technology. 2003. Vol. 87 (3). P. 199-207. https://doi.org/10.1016/S0960-8524(02)00260-2

REFERENCES

1. Vasilev E. V., Papushin E. A., Maksimov D. A., Shalavina E.V., Mateichik S.N. Algorithm to calculate the coefficients for estimating methane emissions from animal/poultry manure handling systems. AgroEkoInzheneriya = AgroEcoEngineering. 2024;1(118):107-118. (In Russ.) https://doi.org/10.24412/2713-2641-2024-1118-107-118 EDN: EEGSXP

2. Bleizgys R., Bajore V., Nainys R., Poškus A. Reduction of the livestock ammonia emission under aerobic treatment of manure. Polish Journal of Environmental Studies. 2013;22(1):23-29. (In Eng.) https://doi.org/10.1155/2013/825437

3. Kupper T., Häni C., Neftel A., Kincaid C., Bühler M., Amon B., VanderZaag A. Ammonia and greenhouse gas emissions from slurry storage-A review. Agriculture, Ecosystems & Environment. 2020;300:106963. (In Eng.) https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106963

4. Vasilev E. V., Kozlova N. P. Nitrogen use efficiency as an environmental impact indicator of an agricultural enterprise. AgroEkoInzheneriya = AgroEcoEngineering. 2023; 2 (115):4-23. (In Russ.) https://doi.org/10.24412 / 2713-2641-2023-2115-4-23 EDN: AVAZXS

5. Overmeyer V., Holtkamp F., Clemens J., Büscher W., Trimborn M. Acidification of slurry to reduce ammonia and methane emissions: Deployment of a retrofittable system in fattening pig barns. Journal of Environmental Management. 2023;331:117263 (In Eng.) https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117263

6. Keskinen R., Termonen M., Luostarinen S., Räty M., Kaseva J., Joki-Tokola E. Slurry acidification outperformed injection as an ammonia emission-reducing technique in boreal grass cultivation. Nutrient Cycling in Agroecosystems. 2022;122(2):139-156. (In Eng.) https://doi.org/10.1007/s10705-021-10190-1

7. Vtoryi V.F., Vtoryi S.V., Kovalev S.V. Assessment of climate-active gas emissions on a cattle dairy farm. AgroEkoInzheneriya = AgroEcoEngineering. 2023;3 (116):124-136. (In Russ.) https://doi.org/10.24412/2713-2641-2023-3116-124-135 EDN: WBSKPJ

8. Yan X., Wang S., Duan H., Li D., Cheng V., Zhang F. A review of mitigation technologies and management strategies for greenhouse gas and air pollutant emissions in livestock production. Journal of Environmental Management. 2024;352:120028. (In Eng.) https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120028

9. Bittman S., Dedina M., Howard C.M., Oenema O., Sutton M.A. (eds.) Reducing ammonia emissions: measures and actions. In: Options for Ammonia Mitigation: Guidance from the UNECE Task Force on Reactive Nitrogen. Edinburgh, UK: Centre for Ecology and Hydrology. 2014:8-13. (In Eng.) URL: https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/510206/1/N510206CR.pdf

10. Hwang O., Yun Y.M., Trabue S. Impact of Bacillus subtilis on manure solids, odor, and microbiome. Journal of Environmental Management. 2023;333:117390. (In Eng.) https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117390

11. Dougherty B., Gray M., Johnson M., Kleber M. Can biochar covers reduce emissions from manure lagoons while capturing nutrients? Journal of Environmental Quality. 2017;46(3):659-666. (In Eng.) https://doi.org/10.2134/jeq2016.12.0478

12. Scotto di Perta E., Mautone A., Oliva M., Cervelli E., Pindozzi S. An effective biochar application for reducing nitrogen emissions from buffalo digestate storage tank. Applied Sciences. 2024;14(15):6456. (In Eng.) https://doi.org/10.3390/app14156456

13. Gautam P., Kumar S., Dhal G.C., Kim K.-H., Pandey A., Karmakar S., Park J. Field application of bio-foam spray to reduce ammonia emission from ammonia-rich swine manure piles. Chemosphere. 2024;349:140756 (In Eng.) https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140756

14. Park J., Kang T., Heo Y., Lee K., Kim K., Lee K., Yoon S. Mitigation of ammonia and hydrogen sulfide emissions by stable aqueous foam-microbial media. Environmental Science & Technology. 2006;40(9):3030-3035. (In Eng.) https://doi.org/10.1021/es051810j

15. Dong H., Mangino J., McAllister T.A., Hatfield J.L., Johnson D.E., Lassey K.R., Aparecida de Lima M., Romanovskaya A. Mitigation technologies and practices for reducing CH_4 emissions from animal manure management. In: 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Hayama, Japan: IGES. 2022;4-10. (In Eng.) URL: https://www.ccacoalition.org/sites/default/files/resources/2022_Mitigation-technologies-and-practices-for-reducing-CH_4-emissions_CCAC.pdf

16. Romaniuk W., Barwicki Ja. Reduction of ammonia emission by slurry acidification and methane fermentation technology. Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produkcii rastenievodstva i zhivotnovodstva = Technologies, machines and equipment for mechanised crop and livestock production. 2017; 91:164-175. (In Eng.) EDN: YODUNZ

17. Shalavina E. V., Vasilev E. V. Improving the environmental safety through the development of technological regulations for processing and application of by-products. AgroEkoInzheneriya = AgroEcoEngineering. 2023;1 (114):141-152. (In Russ.) https://doi.org/10.24412/2713-2641-2023-1114-141-154 EDN: KABEKB

18. Portejoie S., Martinez J., Guiziou F., Coste C.M. Effect of covering pig slurry stores on the ammonia emission processes. Bioresource Technology. 2003;87(3):199-207. (In Eng.) https://doi.org/10.1016/S0960-8524(02)00260-2

Об авторах	**About the authors**
Брюханов Александр Юрьевич доктор технических наук, академик РАН, директор Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, 196634 Россия, Санкт-Петербург, пос. Тярлево, Фильтровское ш. 3 sznii@yandex.ru ORCID: 0000-0003-4963-3821	**Aleksandr Yu. Briukhanov,** DSc (Engineering), Academician of the Russian Academy of Sciences, Director of the 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@yandex.ru ORCID: 0000-0003-4963-3821
Земцев Владимир Иванович 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, Фильтровское ш. 3 vova.zemtsev.00@mail.ru	**Vladimir Ivanovich Zemtsev** post-graduate 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 Russia, Saint Petersburg, Tiarlevo, Filtrovskoje Shosse, 3 vova.zemtsev.00@mail.ru
Заявленный вклад авторов Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации	**Authors' contribution** All authors made an equivalent contribution to the preparation of the manuscript
Конфликт интересов Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат	**Conflict of interest** The authors declare that there is no conflict of interest and they bear equal responsibility for plagiarism
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи к публикации	The authors have read and approved the final version of the manuscript for publication.
Статья поступила в редакцию: 17.03.2026	**Received:** 17.03.2026
Одобрена после рецензирования: 31.08.2026	**Approved after reviewing:** 31.08.2026
Принята к публикации: 11.09.2026	**Accepted for publication:** 11.09.2026

Научная статья
УДК: 631.95 DOI 10.24412/2713-2641-2026-3128-91-105

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ УСТРОЙСТВА ОЧИСТКИ ВОЗДУХА ОТ АММИАКА ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ ОТХОДОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Семен Алексеевич Егоров

Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, Санкт-Петербург, Российская Федерация
simon723132@yandex.ru

Аннотация. Сельскохозяйственное производство является значимым источником выбросов аммиака, сопровождающихся потерями азота и ухудшением экологической безопасности. Цель исследования является теоретическое обоснование процесса очистки воздушного потока от аммиака в фильтрующем слое из торфа с разработкой критериев оценки эффективности процесса очистки. В работе процесс очистки рассмотрен как совокупность массопереноса аммиака из газовой фазы к поверхности частиц торфа, его адсорбции, абсорбции во влаге материала и последующей фиксации преимущественно в аммонийной форме. Для описания процесса использованы пленочная модель массопередачи, зависимости для удельной поверхности дисперсного слоя, скорости воздушного потока и уравнение Эргуна. Параметры системы разделены на входные характеристики воздушного потока, исходные физико-химические свойства торфа и управляемые параметры фильтрующего слоя. В качестве основных технических критериев эффективности определены удельная динамическая емкость торфа по аммиаку и гидравлическое сопротивление слоя. Установлено, что высота и площадь поперечного сечения слоя, размер частиц и влажность торфа оказывают взаимосвязанное и в ряде случаев противоположное влияние на массообмен и гидродинамику. Показано, что рациональные параметры фильтрующего слоя не могут быть определены путем максимизации отдельного показателя. В качестве интегрального критерия оптимизации предложена удельная стоимость удаления аммиака. Сформированная теоретическая модель определяет структуру взаимосвязей между параметрами процесса очистки и направление дальнейших экспериментальных исследований, необходимых для установления количественных зависимостей и определения рационального сочетания параметров фильтрующего слоя при требуемой степени очистки и минимальных удельных затратах.

Ключевые слова: аммиак, торф, фильтрующий слой, массоперенос, очистка воздушных выбросов

Для цитирования: Егоров С.А. Теоретическое обоснование параметров устройства очистки воздуха от аммиака при переработке отходов сельскохозяйственного производства // АгроЭкоИнженерия. 2026. № 3(128). С. 91-106 https://doi.org/10.24412/2713-2641-2026-3128-91-105

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России FGUN-2022-0010

Research article
Universal Decimal Code: 631.95

THEORETICAL FOUNDATIONS OF DEVICE PARAMETERS FOR AMMONIA REMOVAL FROM AIR IN AGRICULTURAL WASTE PROCESSING

Semen A. Egorov

Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production – branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Saint Petersburg, Russian Federation
simon723132@yandex.ru

Abstract. Agricultural production is a significant source of ammonia emissions, accompanied by nitrogen loss and environmental degradation. The purpose of the study was to provide a theoretical basis for removing ammonia from the air stream using a peat filter bed and to establish criteria for evaluating purification efficiency. The process was considered as a sequence of ammonia mass transfer from the gas phase to the peat surface followed by adsorption and absorption. The captured ammonia was then fixed primarily as ammonium. To describe the process, the study combined a film mass transfer model with the Ergun equation and dependencies for the specific surface area of the packed bed and the airflow velocity. The system parameters included the inlet airflow characteristics, the initial physical and chemical properties of peat, and controllable filter bed variables. The specific dynamic capacity of peat for ammonia and the hydraulic resistance of the bed were identified as the main performance criteria. The results showed that the bed height and cross-sectional area, the particle size and peat moisture content had an interrelated and, in some cases, opposing effects on mass transfer and hydrodynamic characteristics. The study established that optimal parameters of the filter bed could not be determined by maximizing a single indicator. The cost per unit mass of ammonia removed was proposed as a comprehensive optimization criterion. The developed theoretical model describes the framework of interrelationships among air cleaning parameters. It also highlights the direction for further experimental research necessary to establish quantitative dependencies and find a rational combination of filter bed parameters at the required purification efficiency and minimum unit costs.

Keywords: ammonia, peat, filter bed, mass transfer, air emissions control

For citation: Egorov S.A. Theoretical foundations of device parameters for ammonia removal from air in agricultural waste processing. AgroEcoEngineering. 2026;3(128):91-106 (In Russ.) https://doi.org/10.24412/2713-2641-2026-3128-91-105

Acknowledgements: The study was a part of research work FGUN-2025-0010 within the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of Russia

Введение. Сельскохозяйственное производство является одним из основных источников поступления аммиака в атмосферный воздух [1]. Значительная часть его выбросов связана с содержанием животных, хранением и переработкой побочной продукции животноводства (ППЖ). При интенсивной переработке ППЖ в органическое удобрение теряется свыше 30% азота, в основном в форме аммиака, в результате образования воздушных выбросов [2]. Это представляет экологическую проблему, а также сопровождается потерями азота, первоначально содержащегося в перерабатываемом материале. Поэтому при разработке

технологий очистки воздушных выбросов целесообразно рассматривать улавливание аммиака с возможностью последующего возврата его в производственный оборот.

Аммиак является летучим соединением, поэтому при очистке он может переходить из жидкой или твердой фазы обратно в газовую. Для его эффективного удержания необходимо перевести в нелетучую, связанную форму, например посредством химического связывания или сорбции поглощающим материалом. Для решения этой задачи могут применяться сорбционные процессы, основанные на взаимодействии аммиака с поверхностью и поровым пространством поглощающего материала [3].

В качестве адсорбентов применяются активированные угли, цеолиты, минеральные и углеродсодержащие материалы. Активированный уголь обладает развитой удельной поверхностью и широко применяется в газоочистке, однако по мере насыщения его сорбционная емкость снижается, вследствие чего требуется замена или регенерация материала. Регенерация активированного угля связана с дополнительными технологическими и энергетическими затратами, а возможность извлечения и последующего целевого использования поглощенного вещества зависит от применяемого способа регенерации [4]. Это ограничивает возможность непосредственного возврата уловленного азота в производственный цикл.

Альтернативой классическим сорбентам могут является природные органические материалы, которые после насыщения соединениями азота потенциально могут быть вовлечены в дальнейший производственный оборот. К таким материалам относится торф. Наличие развитого порового пространства, влаги и кислых функциональных групп гуминовых веществ обеспечивает его способность к поглощению аммиака. Исследования показали, что удаление аммиака торфом может происходить за счет физической и химической сорбции с участием функциональных групп гуминовых веществ [5].

При очистке воздушных выбросов сорбционными методами основным функциональным элементом устройства является поглощающий материал, в объеме и на поверхности которого непосредственно протекают процессы переноса и связывания загрязняющего вещества. В связи с этим эффективность устройства очистки определяется прежде всего свойствами используемого поглощающего материала, условиями его размещения в рабочем объеме и параметрами взаимодействующего с ним воздушного потока. Совокупность этих факторов формирует условия массопереноса загрязняющего вещества из газовой фазы к поглощающей среде и определяет полноту использования потенциальной сорбционной способности материала.

Следовательно, фильтрующий слой следует рассматривать как основной рабочий объект, в котором формируется результат процесса очистки. Конструкция устройства в данном случае должна обеспечивать такие условия прохождения воздушного потока через слой, при которых свойства поглощающего материала используются наиболее полно. Поэтому обоснование эффективности устройства требует установления взаимосвязей между характеристиками очищаемого воздушного потока, свойствами поглощающего материала, параметрами сформированного из него фильтрующего слоя и протекающими в нем процессами массопереноса.

Для торфа указанная задача имеет дополнительную сложность, поскольку его способность к поглощению аммиака обусловлена совокупностью физических, сорбционных, кислотно-основных и ионообменных взаимодействий. При этом параметры материала и условия движения воздушного потока могут одновременно влиять как на интенсивность переноса

аммиака к поглощающей среде, так и на полноту его последующего связывания. Поэтому рассмотрение отдельных свойств торфа или отдельных конструктивных параметров фильтрующего слоя не позволяет в полной мере описать процесс очистки как единую систему.

В существующих исследованиях представлены сведения о способности торфа поглощать аммиак и влиянии отдельных его свойств на сорбционный процесс [6,7]. Однако для обоснования параметров устройства очистки необходимо сформировать целостное представление о последовательности процессов, протекающих при прохождении воздушного потока через фильтрующий слой, и установить систему взаимосвязей между входными параметрами воздушного потока, характеристиками поглощающего материала и параметрами самого фильтрующего слоя. Такая постановка задачи необходима для последующего определения критериев эффективности процесса очистки и экспериментального установления количественных зависимостей между ними и управляемыми параметрами фильтрующего слоя. Отсутствие количественно обоснованных взаимосвязей между этими параметрами не позволяет достоверно определить требуемые характеристики фильтрующего устройства и обеспечить заданную эффективность очистки при приемлемых энергетических и эксплуатационных затратах. Поэтому установление данных зависимостей является необходимым условием проектирования и изготовления технически и экономически эффективной установки для очистки воздушных выбросов.

Цель исследования – теоретическое обоснование процесса очистки воздушного потока от аммиака в фильтрующем слое из торфа с разработкой критериев оценки эффективности процесса очистки.

Материалы и методы. Процесс очистки воздушного потока в фильтрующем слое включает несколько последовательных стадий [8]. Аммиак, находящийся в воздушном потоке, конвективно переносится через поровое пространство слоя, после чего вследствие разности концентраций происходит его массоперенос из газовой фазы к поверхности частиц торфа. Удержание поступившего к поглощающему материалу аммиака может происходить как за счет адсорбции на твердой поверхности торфа, так и вследствие его растворения во влаге, находящейся на поверхности частиц и в их поровом пространстве. Исследования торфяных сорбционных материалов показывают, что удержание аммиака связано с физической и химической сорбцией и взаимодействием с функциональными группами гуминовых веществ [5]. В водной фазе растворенный аммиак находится в равновесии с ионом аммония, при этом наличие кислотных центров торфа способствует его переходу в связанную аммонийную форму.

Таким образом, процесс очистки рассматривается как совокупность массопереноса аммиака из воздушного потока, его адсорбции и абсорбции поглощающим материалом и последующей фиксации преимущественно в аммонийной форме.

Для теоретического описания переноса аммиака из воздушного потока к увлажненной поверхности торфа использована пленочная модель массопередачи, согласно которой скорость переноса вещества определяется движущей силой процесса, коэффициентом массопередачи и площадью межфазного контакта[41]. В общем виде скорость массопереноса представлена выражением

[41] Чуракова С.К. Процессы и аппараты. Часть 2. Массообменные и тепловые процессы: электронный учебно-методический комплекс. Уфа: УГНТУ. 2016. 155 с.

$$\frac{dM}{dt} = K_г * F_{мп} * \Delta C_{мп}, \#(1)$$

где dM – масса аммиака, перешедшего из воздушного потока в поглощающую среду, г; dt – время процесса очистки, с; $K_г$ – обобщенный коэффициент массопередачи, м/с; $F_{мп}$ – эффективная площадь поверхности массопередачи, м^2; $\Delta C_{мп}$ – движущая сила массопереноса, выраженная через разность концентраций аммиака в газовой фазе и у поверхности поглощения, г/м^3.

Из выражения (1) следует, что интенсивность удаления аммиака из воздушного потока определяется условиями его подвода к поглощающей поверхности, характеризуемыми коэффициентом $K_г$, движущей силой $\Delta C_{мп}$, и величиной доступной поверхности контакта воздушного потока с торфом $F_{мп}$.

Торф в фильтрующем слое представляет собой совокупность частиц, между которыми формируется свободное поровое пространство для прохождения воздушного потока. Если принять частицы торфа в форме шара, то удельная поверхность дисперсного слоя может быть выражена зависимостью:

$$\sigma_{ФС} = \frac{6 * (1 - \varepsilon)}{d_{ТФ}}, \#(2)$$

где $\sigma_{ФС}$ – удельная площадь поверхности фильтрующего слоя, м²/м³; ε – пористость слоя, характеризующая долю свободного объема; $d_{ТФ}$ – эквивалентный диаметр частиц торфа, м.

Тогда эффективная площадь поверхности фильтрующего материала $F_{мп}$ определяется как:

$$F_{мп} = \sigma_{ФС} * V_{ФС}, \#(3)$$

где $V_{ФС}$ – объем фильтрующего слоя, м^3.

Объем слоя $V_{ФС}$, в свою очередь, определяется его геометрическими параметрами:

$$V_{ФС} = A_{ФС} * H_{ФС}, \#(4)$$

где $A_{ФС}$ – площадь поперечного сечения фильтрующего слоя, м^2; $H_{ФС}$ – высота фильтрующего слоя, м.

Следовательно, площадь контакта воздушного потока с поглощающим материалом формируется одновременно геометрическими параметрами слоя, размером частиц торфа и его пористостью. Уменьшение размера частиц при прочих равных условиях увеличивает расчетную удельную поверхность материала, однако изменение дисперсности одновременно приводит к изменению структуры порового пространства слоя.

Площадь поперечного сечения фильтрующего слоя определяет скорость прохождения через него воздуха. При заданном объемном расходе воздушного потока данная связь выражается уравнением:

$$\vartheta_{ВП} = \frac{Q}{A_{ФС}}, \#(5)$$

где $\vartheta_{ВП}$ – скорость воздушного потока, м/с; Q – объемный расход воздуха, м^3/с.

Таким образом, площадь поперечного сечения является конструктивным параметром фильтрующего слоя, посредством которого при заданном расходе воздуха формируется скорость потока. Изменение скорости, в свою очередь, изменяет время нахождения воздушного потока в объеме поглощающего материала и условия внешнего массопереноса аммиака к поверхности частиц.

Процесс очистки протекает в пределах адсорбционного фронта высотой $h_{ФА}$, где происходит поглощение загрязняющего вещества (рис.1) [9]. По мере насыщения торфа данный фронт перемещается в направлении движения воздушного потока. Участок слоя перед фронтом характеризуется большей степенью использования сорбционного потенциала материала, тогда как расположенный после него торф остается менее насыщенным. В результате соотношение высоты фильтрующего слоя и протяженности фронта массопереноса определяет полноту использования объема поглощающего материала до появления аммиака на выходе из слоя.

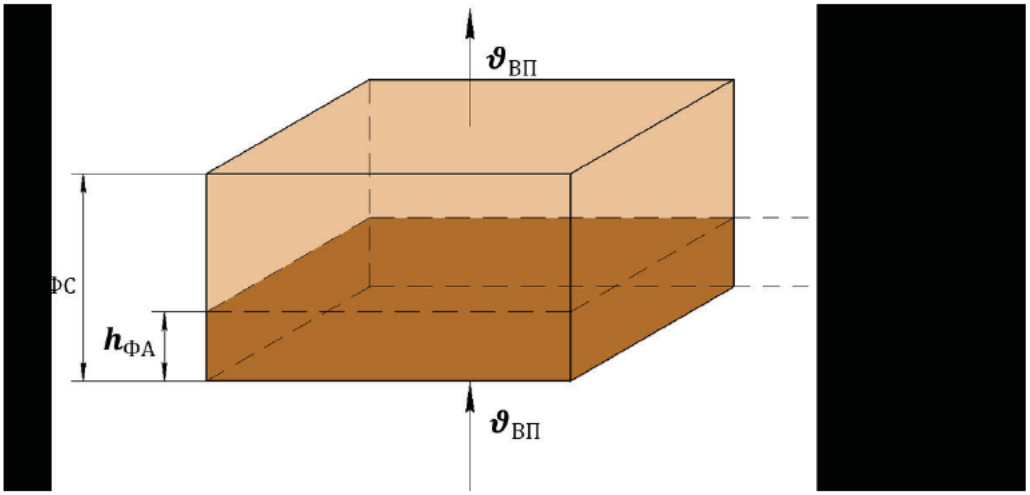


Рис. 1. Фронт адсорбции фильтрующего слоя
Fig. 1. The adsorption front of the filter bed

Прохождение воздушного потока через слой торфа сопровождается потерями давления, которое описывается уравнением Эргуна [10]:

$$\frac{\Delta P}{H_{ФС}} = \left(\frac{(1-\varepsilon)^2 * \vartheta_{ВП} * \mu_Г}{\varepsilon * d_{ТФ}^2} + \frac{(1-\varepsilon) * \rho_Г * \vartheta_{ВП}^{\ 2}}{\varepsilon^3 * d_{ТФ}} \right), \#(6)$$

где $\mu_Г$ – динамическая вязкость газа, Па*с; $\rho_Г$ – плотность газа, кг/м^3.

Выражение (6) показывает, что гидродинамические условия работы фильтрующего слоя определяются совместным влиянием его высоты $H_{ФС}$, пористости ε и размера частиц $d_{ТФ}$, а также скорости проходящего воздушного потока $\vartheta_{ВП}$. При этом параметры дисперсной структуры одновременно участвуют в формировании поверхности массопередачи согласно выражениям (2) и (3) и сопротивления движению воздуха согласно выражению (6). Поэтому массообменные и гидродинамические процессы в фильтрующем слое должны рассматриваться совместно.

Для систематизации факторов, определяющих процесс очистки, параметры исследуемой системы разделены на входные параметры воздушного потока X, управляемые параметры фильтрующего слоя U и исходные физико-химические свойства торфа K.

$$X = (C_{NH3}^{вх}, T_{ВП}, W_{ВП}, Q),$$

где $C_{NH3}^{вх}$ – концентрация аммиака на входе в фильтрующий слой, мг/м^3; $T_{ВП}$ – температура воздушного потока, °С; $W_{ВП}$ – относительная влажность воздушного потока, %.

К управляемым параметрам U отнесены характеристики, которые могут быть заданы при формировании фильтрующего слоя или выборе конструктивных параметров устройства:

$$U = (H_{ФС}, A_{ФС}, k_{ТР}, W_{ТР}),$$

где $k_{ТР}$ – фракционный состав торфа, м; $W_{ТР}$ – массовая доля влаги торфа, %.

Высота $H_{ФС}$ и площадь поперечного сечения $A_{ФС}$ характеризуют геометрические параметры фильтрующего слоя. Фракционный состав торфа k_{TP} определяет размер частиц торфа $d_{TФ}$. Массовая доля влаги W_{TP} может изменяться при предварительной подготовке фильтрующего материала.

К исходным свойствам торфа K отнесены характеристики, обусловленные его происхождением и степенью преобразования органического вещества:

$$K = (x_{TP}^{+}, R_{TP}),$$

где x_{TP}^{+} - гидролитическая кислотность торфа, Мг Экв/100г сух.т.; R_{TP} – степень разложения торфа, %.

Результаты. Проведенный теоретический анализ показал, что результат очистки воздушного потока от аммиака формируется непосредственно в фильтрующем слое вследствие совместного протекания массообменных и гидродинамических процессов. Поэтому эффективность устройства очистки в целом определяется характеристиками сформированного в нем фильтрующего слоя и условиями прохождения через него воздушного потока.

Текущая степень удаления аммиака из воздушного потока может быть определена по изменению его концентрации до и после фильтрующего слоя:

$$\eta = \left(\frac{(C_{NH3}^{вх} - C_{NH3}^{вых})}{C_{NH3}^{вх}}\right) * 100,$$

где η – степень очистки воздушного потока, %; $C_{NH3}^{вых}$ – концентрация аммиака на выходе из фильтрующего слоя, мг/м^3.

Однако величина η, определенная в отдельный момент времени, характеризует только текущее состояние процесса и не отражает полноту использования поглощающего материала за весь период эксплуатации. По мере насыщения торфа фронт массопереноса перемещается по высоте слоя, после чего концентрация аммиака на выходе начинает возрастать. Поэтому для сравнительной оценки фильтрующего материала в качестве основного массообменного критерия принята его удельная динамическая емкость по аммиаку.

Масса аммиака, удержанная фильтрующим слоем до достижения принятой проскоковой концентрации на выходе, определяется интегрированием разности массовых потоков аммиака на входе и выходе из слоя за период его работы до момента проскока:

$$q_{ФС} = Q \int_0^{t_{пр}} [C_{NH3}^{вх}(t) - C_{NH3}^{вых}(t)]\, dt,$$

где $q_{ФС}$ – емкость фильтрующего слоя, г; $t_{пр}$ – время достижения на выходе из фильтрующего слоя предельной концентрации (проскок), с.

Для исключения влияния различного количества загруженного материала и обеспечения возможности сопоставления фильтрующих слоев с различными параметрами динамическую емкость целесообразно выражать относительно массы сухого вещества торфа:

$$q_M = \frac{q_{ФС}}{m_{TP}},$$

где q_M – удельная динамическая емкость торфа по аммиаку, г/кг; m_{TP} – масса торфа в фильтрующем слое, кг.

Величина q_M характеризует степень фактического использования поглощающей способности торфа в заданных условиях прохождения воздушного потока. Чем больше количество аммиака, удерживаемое единицей массы материала до наступления проскока, тем полнее используется фильтрующий материал в течение эксплуатационного цикла.

Вторым критерием эффективности фильтрующего слоя является его гидравлическое сопротивление, определяемое разностью статического давления до и после слоя:

$$\Delta P = P_{\text{СТ}}^{до} - P_{\text{СТ}}^{после},$$

где ΔP – гидравлическое сопротивление фильтрующего слоя, Па; $P_{\text{СТ}}^{до}, P_{\text{СТ}}^{после}$ – статическое давление до и после фильтрующего слоя соответственно, Па.

Гидравлическое сопротивление характеризует энергетические затраты, необходимые для перемещения заданного объема воздушного потока через фильтрующий материал. Его увеличение приводит к повышению требуемой мощности вентиляционного оборудования. Следовательно, повышение эффективности использования сорбционного материала должно рассматриваться совместно с ограничением сопротивления фильтрующего слоя.

На основании этого в качестве основных выходных критериев эффективности фильтрующего слоя определены удельная динамическая емкость q_M и гидравлическое сопротивление ΔP:

$$Y = (q_M, \Delta P)$$

Формирование данных критериев является результатом совместного воздействия параметров поступающего воздушного потока, исходных физико-химических характеристик торфа и управляемых параметров сформированного из него фильтрующего слоя. Общая теоретическая модель процесса может быть представлена в виде:

$$Y = f(X, U, K) = f(C_{NH3}^{вх}, T_{ВП}, W_{ВП}, Q, H_{ФС}, A_{\text{ФС}}, k_{TP}, W_{TP}, x_{TP}^{+}, R_{TP})$$

Таким образом, параметры модели образуют три функциональные группы. Параметры воздушного потока X характеризуют внешние условия протекания процесса очистки. Исходные характеристики торфа K определяются его местом происхождения и видом. Управляемые параметры U могут быть изменены при подготовке торфа и формировании фильтрующего слоя.

Полученная система взаимосвязей показывает, что параметры фильтрующего слоя воздействуют на процесс очистки посредством изменения условий массопереноса и гидродинамики. Размер частиц и структура порового пространства определяют доступную поверхность взаимодействия воздушного потока с поглощающим материалом и одновременно сопротивление его прохождению через слой. Высота и площадь поперечного сечения формируют объем фильтрующего материала и режим движения воздуха. Влажность торфа участвует в формировании среды, в которой происходит растворение и последующее связывание аммиака. Исходные кислотные свойства и степень разложения характеризуют потенциальные свойства используемого торфа как поглощающего материала.

В результате эффективность фильтрующего слоя не может быть определена максимизацией только одного из его выходных показателей. Увеличение интенсивности контакта воздушного потока с поглощающим материалом и степени использования его сорбционного потенциала может сопровождаться изменением гидравлического сопротивления. Поэтому рациональное сочетание управляемых параметров должно обеспечивать совместное достижение высокой удельной динамической емкости и допустимого сопротивления прохождению воздушного потока.

Для оценки эффективности устройства очистки целесообразно ввести показатель удельной стоимости очистки аммиака, которая позволит определить совокупное влияние всех технических параметров:

$$Z_{\text{УД}} = \frac{Z_{\text{ЭН}} + Z_{\text{ФС}} + Z_{\text{Э}}}{M_{\text{NH3}}},$$

где $Z_{УД}$ – удельные затраты на очистку, руб./г; $Z_{ЭН}$ – затраты на электроэнергию для прохождения воздушного потока через фильтрующий слой, руб.; $Z_{ФС}$ – затраты на фильтрующий слой, руб.; $Z_{Э}$ – эксплуатационные затраты, связанные с обслуживанием и заменой фильтрующего материала, руб; M_{NH3} – масса удаленного из воздушного потока аммиака, г.

В данной зависимости масса удаленного аммиака определяется сорбционными характеристиками и степенью использования фильтрующего материала, тогда как энергетическая составляющая связана с гидравлическим сопротивлением слоя. Следовательно, удельная динамическая емкость q_M и гидравлическое сопротивление ΔP являются основными техническими критериями, посредством которых параметры фильтрующего слоя влияют на итоговую удельную стоимость очистки.

Задача обоснования параметров фильтрующего слоя в общем виде может быть представлена как поиск такого сочетания управляемых факторов, при котором достигается минимум удельной стоимости удаления аммиака, с учетом обеспечении требуемой степени очистки воздушного:

$$Z_{УД}(U) \rightarrow min$$

Обсуждение. Полученная теоретическая модель показывает, что эффективность очистки воздушного потока от аммиака в фильтрующем слое из торфа определяется не отдельным параметром материала или конструкции, а их совместным воздействием на массообменные и гидродинамические процессы. При этом влияние управляемых параметров на удельную динамическую емкость и гидравлическое сопротивление может иметь различную направленность. Это определяет многокритериальный характер задачи обоснования параметров фильтрующего слоя.

Одним из наиболее значимых параметров является размер частиц торфа. В соответствии с выражением (2) уменьшение диаметра частиц приводит к увеличению удельной геометрической поверхности слоя, доступной для взаимодействия с воздушным потоком. Согласно уравнению массопередачи (1), увеличение площади межфазного контакта при прочих равных условиях создает предпосылки для повышения интенсивности переноса аммиака из газовой фазы к поглощающему материалу. Следовательно, уменьшение размера частиц потенциально может способствовать более полному использованию сорбционной способности торфа.

Вместе с тем уменьшение размера частиц оказывает противоположное воздействие на гидродинамические характеристики слоя. Из уравнения (6) следует, что уменьшение размера частиц сопровождается увеличением гидравлического сопротивления, причем вклад вязкостной составляющей обратно пропорционален квадрату размера частиц. Дополнительное влияние может быть связано с изменением структуры слоя, уменьшение размера частиц и их агломерация способны снижать пористость, что также приводит к росту сопротивления воздушному потоку. Таким образом, уменьшение размера частиц не может рассматриваться как однозначный способ повышения эффективности очистки, поскольку увеличение поверхности массопередачи сопровождается ухудшением гидродинамических условий.

Высота фильтрующего слоя также оказывает комплексное влияние на процесс очистки. Ее увеличение при постоянной площади поперечного сечения увеличивает объем и массу поглощающего материала, находящегося на пути движения воздушного потока. Это создает возможность удержания большего количества аммиака и увеличивает расстояние, которое

должен пройти фронт массопереноса до появления загрязняющего вещества на выходе. Однако увеличение высоты слоя одновременно приводит к росту гидравлического сопротивления и повышает риск уплотнения торфа под действием собственного веса и перепада давления. Уплотнение может сопровождаться снижением пористости и проницаемости слоя, ухудшением равномерности распределения воздушного потока и дополнительным увеличением гидравлического сопротивления, что негативно влияет на условия массопереноса и энергетическую эффективность процесса. При неизменных свойствах материала и скорости воздушного потока перепад давления пропорционален высоте слоя. Следовательно, увеличение высоты слоя целесообразно только до уровня, при котором дополнительное количество поглощающего материала эффективно используется до наступления проскока и компенсирует возрастающие энергетические затраты.

С данным положением связано значение фронта массопереноса при формировании рациональной высоты фильтрующего слоя. Если протяженность активной зоны значительна относительно общей высоты слоя, часть материала к моменту достижения принятой проскоковой концентрации остается использованной не полностью. Напротив, уменьшение относительной протяженности фронта позволяет увеличить долю фильтрующего материала, находящегося к моменту проскока в состоянии, близком к насыщению. Поэтому рациональная высота слоя должна определяться не только его геометрическим размером или общей массой торфа, но и закономерностями формирования и перемещения фронта массопереноса.

Площадь поперечного сечения фильтрующего слоя влияет на процесс прежде всего посредством изменения поверхностной скорости воздушного потока. При фиксированном расходе воздуха увеличение площади сечения приводит к снижению скорости и увеличению продолжительности нахождения газа в фильтрующем слое. Более продолжительный контакт потенциально способствует переносу аммиака в поглощающий материал и может обеспечивать более полное использование его сорбционной способности. Однако связь между скоростью воздушного потока и интенсивностью массопереноса не является линейной. Чрезмерное снижение скорости уменьшает интенсивность конвективного подвода загрязняющего вещества к поверхности частиц и может снижать внешний коэффициент массопередачи [11]. Поэтому максимальное время контакта не тождественно максимальной эффективности массопереноса, а для заданного расхода воздуха должна существовать рациональная площадь поперечного сечения, обеспечивающая требуемое сочетание продолжительности контакта и интенсивности переноса вещества.

Массовая доля влаги отличается от рассмотренных геометрических параметров тем, что непосредственно влияет на условия последующей фиксации аммиака после его переноса из воздушного потока. Наличие влаги на поверхности и в поровом пространстве торфа обеспечивает возможность растворения аммиака и его перехода в аммонийную форму. Поэтому недостаточное содержание влаги может ограничивать использование механизмов абсорбции и кислотно-основного связывания. Вместе с тем, увеличение влажности способно изменять физическую структуру слоя, способствовать сближению и слипанию частиц и уменьшению свободного порового пространства, что приводит к изменению площади доступной поверхности и увеличению гидравлического сопротивления. Следовательно, для влажности также следует ожидать существования области рациональных значений.

Исходные свойства торфа в виде степени разложения и гидролитической кислотности необходимо рассматривать отдельно от управляемых параметров. Кислотные свойства

материала непосредственно связаны с возможностью химического и ионообменного удержания аммиака. Проведенные ранее исследования показали более кислый торф, как правило, обладает большей способностью к связыванию аммиака вследствие более высокого содержания кислых функциональных групп органического вещества, прежде всего карбоксильных и фенольных. Эти группы участвуют в протонировании аммиака и последующем удержании образующегося аммония за счет ионного обмена и других сорбционных взаимодействий, что повышает потенциальную сорбционную емкость торфа по отношению к аммиаку [12,13]. Степень разложения характеризует состояние органического вещества и структуру конкретного вида торфа. Однако в рамках сформированной модели направление и количественная величина влияния степени разложения на динамическую емкость заранее не задаются. Эти характеристики определяют исходные свойства выбранного поглощающего материала и должны учитываться при сравнении различных видов торфа.

Таким образом, четыре выделенных управляемых параметра $H_{ФС}, A_{ФС}, k_{ТР}, W_{ТР}$, не могут оптимизироваться независимо друг от друга. Увеличение площади поверхности массопередачи за счет уменьшения частиц способно одновременно увеличить гидравлическое сопротивление. Увеличение высоты слоя повышает количество поглощающего материала, но увеличивает энергетические затраты. Изменение площади поперечного сечения изменяет скорость и условия массопереноса. Влажность одновременно участвует в связывании аммиака и формировании структуры порового пространства. Поэтому выбор параметров только по максимальному значению удельной динамической емкости не обеспечивает рациональной работы устройства.

Показатель удельной стоимости удаления аммиака $Z_{УД}$ позволяет привести данные противоречивые воздействия к единому критерию. Повышение удельной динамической емкости способствует снижению расхода фильтрующего материала и периодичности его замены в расчете на единицу массы уловленного аммиака. В то же время увеличение гидравлического сопротивления приводит к росту энергетических затрат на перемещение воздуха. Поэтому минимальная удельная стоимость очистки должна соответствовать компромиссному сочетанию сорбционных и гидродинамических характеристик фильтрующего слоя.

Проведенный теоретический анализ позволяет определить структуру взаимосвязей между параметрами системы и направления их возможного воздействия, однако не позволяет получить численные значения рациональных параметров фильтрующего слоя. Уравнение массопередачи (1) содержит обобщенный коэффициент $K_г$, зависящий от конкретных гидродинамических условий и свойств поверхности материала, а использование геометрической площади частиц не учитывает в полной мере доступность внутреннего порового пространства торфа. Аналогично применение уравнения Эргуна (6) предполагает описание слоя через эквивалентный размер частиц и пористость, тогда как структура природного торфа может изменяться при увлажнении, уплотнении и продолжительном воздействии воздушного потока. Вследствие этого использование только расчетных зависимостей недостаточно для количественного определения удельной динамической емкости и гидравлического сопротивления реального торфяного слоя.

Для обоснования параметров устройства с фильтрующим слоем из торфа необходимо экспериментально установить зависимости:

$$q_M = f(H_{ФС}, A_{ФС}, k_{ТР}, W_{ТР}) \mid X, K$$

$$\Delta P = f(H_{ФС}, A_{ФС}, k_{TP}, W_{TP}) \mid X, K$$

Также необходимо определить области сочетаний управляемых параметров, при которых обеспечивается требуемая степень удаления аммиака при минимальных удельных затратах на очистку. Особое значение имеет оценка совместного влияния факторов, поскольку изменение одного из них может изменять действие остальных через пористость, площадь межфазного контакта, скорость воздушного потока и положение фронта массопереноса.

Следовательно, сформированная теоретическая модель определяет направление дальнейших экспериментальных исследований. Их задачей должно стать получение количественных зависимостей удельной динамической емкости и гидравлического сопротивления от управляемых параметров фильтрующего слоя с учетом входных характеристик воздушного потока и исходных свойств торфа. Полученные зависимости позволят перейти от теоретического описания процесса к определению рациональных параметров фильтрующего слоя по критерию минимальной удельной стоимости удаления аммиака.

Заключение. Теоретически установлена последовательность процессов удаления аммиака при прохождении воздушного потока через слой торфа: конвективный перенос аммиака в поровом пространстве слоя, массоперенос из газовой фазы к поверхности частиц, адсорбция и растворение во влаге торфа с последующей фиксацией преимущественно в аммонийной форме. Показано, что результат очистки формируется совместным протеканием массообменных и гидродинамических процессов в фильтрующем слое.

Сформирована теоретическая модель процесса очистки, включающая три группы определяющих факторов. К входным параметрам воздушного потока отнесены концентрация аммиака, температура, относительная влажность и расход воздуха. К исходным свойствам торфа гидролитическая кислотность и степень разложения. К управляемым параметрам фильтрующего слоя его высота и площадь поперечного сечения, размер частиц и массовая доля влаги торфа. В качестве основных технических критериев эффективности определены удельная динамическая емкость торфа по аммиаку и гидравлическое сопротивление слоя.

Установлены направления влияния управляемых параметров на процесс очистки. Уменьшение размера частиц увеличивает расчетную площадь межфазного контакта, но одновременно повышает гидравлическое сопротивление. Увеличение высоты слоя увеличивает количество поглощающего материала и длину пути фронта массопереноса до проскока аммиака, но приводит к росту сопротивления и повышает вероятность уплотнения слоя. Изменение площади поперечного сечения определяет скорость воздушного потока и продолжительность его контакта с торфом. Влажность материала влияет одновременно на условия растворения и связывания аммиака и на структуру порового пространства слоя. Следовательно, рациональные значения указанных параметров должны определяться с учетом их совместного влияния.

Для многокритериальной оценки параметров фильтрующего слоя предложен интегральный критерий в виде удельной стоимости удаления аммиака, учитывающий затраты на фильтрующий материал, его эксплуатацию и энергозатраты на преодоление гидравлического сопротивления. Задача обоснования параметров устройства сформулирована как поиск сочетания управляемых параметров, обеспечивающего минимальную удельную стоимость удаления аммиака при заданной степени очистки воздушного потока.

Установлено, что имеющиеся теоретические зависимости позволяют определить структуру и направления взаимосвязей между параметрами процесса, но не позволяют количественно определить рациональные значения параметров торфяного слоя. Для последующего

проектирования устройства необходимо экспериментально установить зависимости удельной динамической емкости и гидравлического сопротивления от высоты и площади поперечного сечения слоя, размера частиц и влажности торфа с учетом характеристик поступающего воздушного потока и исходных свойств материала.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Васильев Э.В., Казанцев И.Н. Анализ методов очистки выбросов загрязняющих веществ, образуемых в процессе биоферментации // АгроЭкоИнженерия. 2021. № 4(109). С. 106-117. https://doi.org/10.24412/2713-2641-2021-4109-106-116

2. Zhao S., Schmidt S., Qin W., Li J., Li G., Zhang W. Towards the circular nitrogen economy – A global meta-analysis of composting technologies reveals much potential for mitigating nitrogen losses // Science of the Total Environment. 2020. Vol. 704. Article 135401. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135401

3. Han B., Butterly C., Zhang W., He J.-Z., Chen D. Adsorbent materials for ammonium and ammonia removal: A review // Journal of Cleaner Production. 2021. Vol. 283. Article 124611. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124611

4. Wang Y., Wu G., Zhang Y., Su Y., Zhang H. The deactivation mechanisms, regeneration methods and devices of activated carbon in applications // Journal of Cleaner Production. 2024. Vol. 476. Article 143751. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143751

5. Vaillancourt N., Parent L.E., Buteau P., Parent V., Karam A. Sorption of ammonia and release of humic substances as related to selected peat properties // Canadian Journal of Soil Science. 1999. Vol. 79. No. 2. P. 311-315. https://doi.org/10.4141/S98-046

6. Черткова Е.Ю. Аммонизация торфа в полевых условиях // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2023. № 3(19). С. 62-70. https://doi.org/10.46573/2658-5030-2023-3-62-70

7. Цыганов А.Р., Томсон А.Э., Боголицын К.Г., Соколова Т.В., Стригуцкий В.П., Пехтерева В.В., Селянина С.Б., Парфенова Л.Н., Труфанова М.В. Получение сорбционных материалов на основе торфа // Химия растительного сырья. 2014. № 3. С. 295-302. https://doi.org/10.14258/jcprm.1403295

8. Baquerizo G., Maestre J.P., Sakuma T., Deshusses M.A., Gamisans X., Gabriel D., Lafuente J. A detailed model of a biofilter for ammonia removal: Model parameters analysis and model validation // Chemical Engineering Journal. 2005. Vol. 113. No. 2-3. P. 205-214. https://doi.org/10.1016/j.cej.2005.03.003

9. Mesfer M.K.A., Danish M., Khan M.I. Continuous fixed bed CO_2 adsorption: Breakthrough, column efficiency, mass transfer zone // Processes. 2020. Vol. 8. No. 10. Article 1233. https://doi.org/10.3390/pr8101233

10. Котельников Д.А., Ахметов Р.Ф., Теляшев Э.Г., Котельникова А.Ю., Набиева А.Р. Моделирование нерегулярных насадочных контактных устройств средствами вычислительной гидродинамики // Башкирский химический журнал. 2020. № 27(2). С. 74-80. https://doi.org/10.17122/bcj-2020-2-74-80

11. Kim S., Deshusses M.A. Determination of mass transfer coefficients for packing materials used in biofilters and biotrickling filters for air pollution control. 1. Experimental results // Chemical Engineering Science. 2008. Vol. 63. No. 3. P. 841-855. https://doi.org/10.1016/j.ces.2007.10.011

12. Togashi I., Suzuki M., Hirai M., Shoda M., Kubota H. Removal of NH_3 by a peat biofilter without and with nitrifier // Journal of Fermentation Technology. 1986. Vol. 64. No. 5. P. 425-432. https://doi.org/10.1016/0385-6380(86)90030-0

13. McNevin D., Barford J. Inter-relationship between adsorption and pH in peat biofilters in the context of a cation-exchange mechanism // Water Research. 2001. Vol. 35. No. 3. P. 736-744. https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00305-5

REFERENCES

1. Vasilev E.V., Kazantsev I.N. Review of cleaning methods of pollutant emissions generated during fermentation. AgroEcoEngineeriya = AgroEcoEngineering. 2021;4(109):106–117. (In Russ.) https://doi.org/10.24412/2713-2641-2021-4109-106-116

2. Zhao S., Schmidt S., Qin W., Li J., Li G., Zhang W. Towards the circular nitrogen economy – A global meta-analysis of composting technologies reveals much potential for mitigating nitrogen losses. Science of the Total Environment. 2020;704:135401. (In Eng.) https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135401

3. Han B., Butterly C., Zhang W., He J.-Z., Chen D. Adsorbent materials for ammonium and ammonia removal: A review. Journal of Cleaner Production. 2021;283:124611. (In Eng.) https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124611

4. Wang Y., Wu G., Zhang Y., Su Y., Zhang H. The deactivation mechanisms, regeneration methods and devices of activated carbon in applications. Journal of Cleaner Production. 2024;476:143751. (In Eng.) https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143751

5. Vaillancourt N., Parent L.E., Buteau P., Parent V., Karam A. Sorption of ammonia and release of humic substances as related to selected peat properties. Canadian Journal of Soil Science. 1999;79(2):311-315. (In Eng.) https://doi.org/10.4141/S98-046

6. Chertkova E.Yu. Field ammonisation of peat. Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya “Tekhnicheskie nauki” = Vestnik of Tver State Technical University. Series “Technical Sciences”. 2023;3(19):62-70. (In Russ.) https://doi.org/10.46573/2658-5030-2023-3-62-70

7. Tsyganov A.R., Tomson A.E., Bogolitsyn K.G., Sokolova T.V., Strigutskiy V.P., Pekhtereva V.V., Selyanina S.B., Parfenova L.N., Trufanova M.V. Creation of sorption materials based on peat. Khimiya rastitel'nogo syr'ya = Chemistry of Plant Raw Material. 2014;(3):295-302. (In Russ.) https://doi.org/10.14258/jcprm.1403295

8. Baquerizo G., Maestre J.P., Sakuma T., Deshusses M.A., Gamisans X., Gabriel D., Lafuente J. A detailed model of a biofilter for ammonia removal: Model parameters analysis and model validation. Chemical Engineering Journal. 2005;113(2–3):205-214. (In Eng.) https://doi.org/10.1016/j.cej.2005.03.003

9. Mesfer M.K.A., Danish M., Khan M.I. Continuous fixed bed CO_2 adsorption: Breakthrough, column efficiency, mass transfer zone. Processes. 2020;8(10):1233. (In Eng.) https://doi.org/10.3390/pr8101233

10. Kotelnikov D.A., Akhmetov R.F., Telyashev E.G., Kotelnikova A.Yu., Nabieva A.R. Simulation of irregular nozzle of the contact devices by means of computational fluid dynamics. Bashkirskii khimicheskii zhurnal = Bashkir Chemical Journal. 2020;27(2):74-80. (In Russ.) https://doi.org/10.17122/bcj-2020-2-74-80

11. Kim S., Deshusses M.A. Determination of mass transfer coefficients for packing materials used in biofilters and biotrickling filters for air pollution control. 1. Experimental results. Chemical Engineering Science. 2008;63(3):841-855. (In Eng.) https://doi.org/10.1016/j.ces.2007.10.011

12. Togashi I., Suzuki M., Hirai M., Shoda M., Kubota H. Removal of NH_3 by a peat biofilter without and with nitrifier. Journal of Fermentation Technology. 1986;64(5):425-432. (In Eng.) https://doi.org/10.1016/0385-6380(86)90030-0

13. McNevin D., Barford J. Inter-relationship between adsorption and pH in peat biofilters in the context of a cation-exchange mechanism. Water Research. 2001;35(3):736744. (In Eng.) https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00305-5

Об авторе:	**About the authors:**
Егоров Семен Алексеевич, младший научный сотрудник в Институте агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (196625, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, п. Тярлево, Фильтровское ш., д. 3), ORCID: https://orcid.org/0009-0008-3948-6171, Researcher ID: QIU-7929-2026, SPIN-код: 5149-7642, simon723132@yandex.ru	Semen A. Egorov, junior 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 3, Filtrovskoje Shosse, Tiarlevo, Saint Petersburg 196634, Russian Federation, ORCID: 0009-0008-3948-6171, Researcher ID: QIU-7929-2026, SPIN code: 5149-7642, simon723132@yandex.ru
Заявленный вклад автора:	**Author's contribution:**
Концептуализация, сбор и анализ материалов по теме исследования, предложение гипотезы и методов исследования.	Conceptualization, collection and analysis of materials on the research topic, proposal of hypotheses and research methods.
Конфликт интересов:	**Conflict of interest:**
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов и несет ответственность за плагиат Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи к публикации	The author declares that there is no conflict of interest and he is responsible for plagiarism. The author has read and approved the final version of the manuscript for publication
Статья поступила в редакцию: 19.08.2026	**Received:** 19.08.2026
Одобрена после рецензирования: 09.09.2026	**Approved after reviewing:** 09.09.2026
Принята к публикации: 11.09.2026	**Accepted for publication:** 11.09.2026

Научная статья
УДК 636.1:631.3 DOI 10.24412/2713-2641-2026-3128-106-117

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМУ ПРОЕКТИРОВАНИЮ КОНЕВОДЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Александр Александрович Давыдов

Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса (ФГБНУ Росинформагротех), р. п. Правдинский, Московская область, Россия
a.davydov@rosinformagrotech.ru, https://orcid.org/0009–0009–4885–0075

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена устареванием нормативно-методической базы технологического проектирования коневодческих предприятий при одновременном росте поголовья лошадей в РФ на 2,3% в 2024 г. и необходимостью достижения целевых показателей Стратегии развития коневодства до 2025 г. В работе представлено научное обоснование современных нормативов проектирования с учетом требований благополучия животных, энергоэффективности и цифровизации. На основе анализа статистических данных Росстата за 2000-2024 гг., изучения действующих Сводов правил по сельскохозяйственным и животноводческим предприятиям, градостроительству, а также ветеринарных правил содержания лошадей, сравнительного анализа международного опыта и технико-экономического расчета для предприятия мощностью 200 голов установлено, что оптимизация нормативов площадей позволяет снизить капитальные затраты на строительство на 10% и эксплуатационные расходы на отопление на 10%. Научно обоснованные параметры микроклимата обеспечивают снижение заболеваемости лошадей на 15-20%. Разработан интегральный показатель благополучия лошадей со шкалой оценки от 0 до 100%. Выявлены критические пробелы устаревшего рекомендательного документа, включая отсутствие дифференцированных нормативов по породам и половозрастным группам, игнорирование цифровых технологий и недостаточную проработку требований для крестьянских (фермерских) хозяйств и личных подсобных хозяйств, составляющих 92% всех хозяйств отрасли. Внедрение современных нормативов создает условия для достижения целевых показателей Стратегии развития коневодства РФ до 2025 г., включая рост поголовья до 1,6 млн голов, в том числе заводских пород – до 40 тыс. голов.

Ключевые слова: коневодство, технологическое проектирование, нормативная документация, благополучие животных, энергоэффективность, цифровизация, нормативы площадей.

Для цитирования: Давыдов А.А. Современные подходы к технологическому проектированию коневодческих предприятий // АгроЭкоИнженерия. 2026. № 3(128). С. 106-118 https://doi.org/ 10.24412/2713-2641-2026-3128-106-117

Research article
Universal Decimal Code 636.1:631.3

MODERN APPROACHES TO TECHNOLOGICAL DESIGN OF HORSE BREEDING ENTERPRISES

Alexander A. Davydov

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
a.davydov@rosinformagrotech.ru, https://orcid.org/0009–0009–4885–0075

Abstract. The study relevance is explained by several reasons. The regulatory and methodological framework for technological design of horse breeding farms is becoming outdated. At the same time, the horse population in the Russian Federation grew by 2.3% in 2024 and there is a pressing need to achieve the target indicators of the Horse Breeding Development Strategy until 2025. This study aimed to scientifically justify modern design standards incorporating animal welfare requirements, energy efficiency and digitalization. Research methods included the analysis of statistical data of the Federal State Statistics Service for 2000-2024, a review of current Codes of Practice, a comparative analysis of international experience and technical and economic calculation for an enterprise with a capacity of 200 head. The results showed that optimization of space allocations allowed reducing capital construction costs by 10% and operating heating costs by 10%. Research-based microclimate parameters ensured reduction of horse diseases by 15-20%. A composite indicator of horse welfare has been developed, allowing objective assessment of housing conditions on a scale from zero to 100% with clear interpretation of results. The discussion revealed critical gaps in the outdated recommendatory document: lack of differentiated standards by breeds and age groups, ignoring digital technologies, and insufficient elaboration of requirements for smallholder and personal subsidiary farms, constituting 92% percent of all industry farms. Implementation of modern standards creates conditions for achieving target indicators of the Horse Breeding Development Strategy of the Russian Federation until 2025, including the herd growth to one million six hundred thousand head and the increase of stud-bred horses to forty thousand head.

Keywords: horse breeding, technological design, regulatory documentation, animal welfare, energy efficiency, digitalization, area standards

For citation: Davydov A.A. Modern approaches to technological design of horse breeding enterprises. AgroEcoEngineering. 2026;3(128):106-118 (In Russ.) https://doi.org/10.24412/2713-2641-2026-3128-106-117

Введение. Коневодство, являясь одной из древнейших отраслей сельского хозяйства, сохраняет актуальность благодаря многофункциональности лошади: производство мяса и молока, спортивное и развлекательное использование, работа на труднодоступных территориях, культурно-историческое значение [1, 2, 3]. По данным Росстата, поголовье лошадей в РФ на 1 января 2024 г. составило 1687,4 тыс. голов, что на 2,3% превышает показатель 2023 года, свидетельствуя о постепенном восстановлении отрасли[42]. Однако

[42]Федеральная служба государственной статистики (Росстат). Сельское хозяйство. Официальная статистика. [Электронный ресурс] URL: https://rosstat.gov.ru/folder/23852; https://rosstat.gov.ru/enterprise_economy (дата обращения: 15.08.2026)

структура поголовья характеризуется доминированием мелких форм хозяйствования: личные подсобные хозяйства – 68%, крестьянские (фермерские) хозяйства – 24%, с/х организации – менее 8%.[43] Такая фрагментация создает трудности для формирования устойчивых товарных цепочек, стандартизации продукции и внедрения современных технологий [4]. Современное международное сообщество признает необходимость ограждения и защиты животных от жестокого обращения. Эволюция представлений о благополучии животных привела к формированию концепции «пять свобод»: свобода от голода и жажды; свобода от дискомфорта; свобода от боли, травм и болезней; свобода в осуществлении нормального для вида поведения; свобода от страха и страданий [5, 6]. Благополучие лошадей определяется как внутреннее субъективное состояние организма, формируемое на основе сенсорной, эмоциональной и когнитивной переработки информации о внешней среде, а также об изменениях гомеостатических параметров [6]. Оценка благополучия должна быть комплексной и строиться на оценке физического и психоэмоционального состояния, учитывая, что большинство животных длительное время содержится в конюшнях в обедненной раздражителями среде [6].

Управление благополучием лошадей должно быть ориентировано на снижение интенсивности и частоты критически негативных факторов среды до допустимого физиологического порога, который обеспечивает реализацию адаптивного и видоспецифического поведения. Оценка благополучия преследует цель, помимо обеспечения базового выживания, формирование условий, позволяющих лошадям реализовывать поведенческий и физиологический потенциал в полном объёме, что невозможно в рамках систем, опирающихся исключительно на минимальные требования к жизнеобеспечению и исключающих элементы обогащения окружающей среды [6].

Создание и модернизация коневодческих предприятий невозможны без четкой современной нормативно-методической базы, регламентирующей процессы технологического проектирования. Устаревший документ «Методические рекомендации по технологическому проектированию коневодческих предприятий», утвержденный в 2013 г., больше не отражает реалий современного производства[44]. За прошедшие годы произошли существенные изменения в законодательной базе, появились новые технологии и оборудование, изменились подходы к обеспечению благополучия животных и энергоэффективности [5, 7]. В этой связи анализ существующих нормативов и их научное обоснование становится необходимой научно-практической задачей, требующей глубокого научного подхода [8], анализа передового опыта и системного решения проблем отрасли.

Международный опыт демонстрирует, что современные подходы к проектированию, учитывающие благополучие животных и энергоэффективность, повышают экономическую устойчивость предприятий и обеспечивают соответствие требованиям глобальных рынков. В странах Европейского Союза проектирование коневодческих объектов регламентируется не только строительными нормами, но и директивами по защите животных, устанавливающими

[43]Поголовье скота в хозяйствах всех категорий. Единая межведомственная информационно-статистическая система (ЕМИСС). [Электронный ресурс] URL: https://fedstat.ru (дата обращения: 15.08.2026)

[44] Методические рекомендации по технологическому проектированию коневодческих предприятий: РД-АПК 1.10.04.03-13. М.: Минсельхоз России. 2013. 131 с.

минимальные стандарты содержания, включая достаточное пространство для свободного движения и социальных контактов[45].

Цель исследования. Научное обоснование современных нормативов технологического проектирования коневодческих предприятий с учетом биологических особенностей лошадей, требований благополучия животных, энергоэффективности и цифровизации для обеспечения устойчивого развития отрасли в Российской Федерации.

Материалы и методы. Исследование, проведенное в 2024-2025 гг., основано на анализе статистических данных Федеральной службы государственной статистики за 2024 г. по динамике поголовья лошадей, региональной структуре отрасли и формам хозяйствования. Нормативную основу составили действующие Своды правил по сельскохозяйственным и животноводческим предприятиям, градостроительству, а также ветеринарные правила содержания лошадей[46, 47, 48, 49] [9-12]. В работе учтен международный опыт, включая Директиву о защите животных, рекомендации Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединенных Наций и практику проектирования в Канаде и США [6, 7]. Технико-экономические расчеты выполнены для предприятия мощностью 200 голов с применением методики определения экономической эффективности капитальных вложений [13].

Анализ нормативных требований выполнен с применением методов систематизации, сравнительного анализа и верификации документальных источников. Исследование носит качественный характер и направлено на выявление системных характеристик и противоречий в действующей нормативной базе. Количественные показатели нормативных требований приведены в абсолютных значениях с обязательной привязкой к источникам документации.

Результаты. Сравнительный анализ выявил ключевые недостатки устаревшего рекомендательного документа (табл. 1): отсутствие дифференцированных нормативов по породам и половозрастным группам, игнорирование цифровых технологий [14] и энергоэффективности, недостаточная проработка требований для мелких форм хозяйствования.

---

[45] The Council of the European Union. Council Directive 98/58/EC of 20 July 1998 concerning the protection of animals kept for farming purposes // Official Journal of the European Communities. 1998. L 221. P. 23-27. URL: http://data.europa.eu/eli/dir/1998/58/2019-12-14 (дата обращения 15.01.2026)

[46] СП 19.13330.2019. Сельскохозяйственные предприятия. Планировочная организация земельного участка: актуализированная редакция СНиП 2.10.02-84*: утв. приказом Минстроя России от 25.12.2019 № 838/пр: введ. 01.07.2020. М.: Стандартинформ. 2020. 72 с.

[47] СП 289.1325800.2017. Сооружения животноводческих, птицеводческих и звероводческих предприятий. Правила проектирования: утв. приказом Минстроя России от 27.12.2017 № 1658/пр: введ. 01.07.2018. М.: Стандартинформ. 2018. 156 с.

[48] СП 42.13330.2021. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений: актуализированная редакция СНиП 2.07.01-89*: утв. приказом Минстроя России от 27.12.2021 № 938/пр: введ. 01.07.2022. М.: Стандартинформ. 2022. 144 с.

[49] Ветеринарные правила содержания лошадей и организации ветеринарно-санитарных мероприятий в коневодческих хозяйствах: утв. приказом Минсельхоза России от 15.12.2020 № 745: зарегистрированы в Минюсте России 25.01.2021 № 62089. М.: Минсельхоз России. 2021. 36 с.

Таблица 1. Сравнительная характеристика устаревшего документа и современных нормативных требований

Table 1. Comparative analysis of the outdated document and the current regulatory requirements

Параметр сравнения	Устаревший документ (2013 г.)	Современные нормативные требования
Нормативная база	Опирается на устаревшие СНиП и СП	Учитывает актуальные Своды правил, ветеринарные правила 2020-2024 годов
Системы содержания	Основное внимание уделено стойловой системе	Детальная проработка стойловой, пастбищной и стойлово-пастбищной систем с учетом климатических зон
Нормативы площадей	Усредненные значения без учета породных особенностей	Дифференцированные нормативы по половозрастным группам, породам и направлениям продуктивности
Энергоэффективность	Не рассматривается	Требования к теплоизоляции, рекуперации тепла, использованию возобновляемых источников энергии
Цифровизация	Не учитывается	Рекомендации по интеграции систем мониторинга, управления и контроля

Научно обоснованные нормативы проектирования.

Разработаны дифференцированные нормативы площадей для стойлового содержания (табл. 2), основанные на анатомо-морфологических данных, поведенческих исследованиях, ветеринарно-санитарных требованиях и технологических параметрах. Минимальная площадь для взрослой кобылы составляет 12 м², для производителя – 18 м², для кобылы с жеребенком – 16 м².

Таблица 2. Нормативы площадей для лошадей различных половозрастных групп при стойловом содержании

Table 2. Normative space allowances for horses by age and sex groups in stall-based systems

Половозрастная группа	Живая масса, кг	Минимальная площадь на 1 голову, м²	Рекомендуемая площадь на 1 голову, м²	Особенности размещения
Жеребята до 6 месяцев	100-150	6	8	Групповое содержание по 8-12 голов в отдельном секционном помещении
Жеребята 6–18 месяцев	250-400	9	12	Групповое содержание по 6-10 голов с возможностью выгула
Молодняк 18–24 месяца	400-500	10	14	Раздельное содержание по полу, возможность выгула
Взрослые кобылы	450-550	12	15	Беспривязное или привязное содержание,

(основное стадо)				доступ к выгульному загону
Кобылы с жеребенком (до 6 мес.)	550-700 (вместе)	16	20	Индивидуальные станки или малые группы по 3-4 матки
Производители	500-650	18	22	Индивидуальное содержание с ежедневным выгулом на манеже
Лошади спортивного назначения	450-600	14	18	Беспривязное содержание с ежедневным выгулом
Лошади мясных пород (откорм)	500-650	10	13	Групповое содержание по 15-20 голов, усиленная вентиляция

Оптимизированные нормативы площадей для предприятия на 200 голов позволили снизить общую площадь конюшен с 2800 до 2520 м² (на 10%), что обеспечило экономию капитальных затрат на строительство 7,0 млн руб. и эксплуатационных расходов на отопление 300 тыс. руб. в год (табл. 3).

Таблица 3. Экономический эффект от применения оптимизированных нормативов площадей для коневодческого предприятия на 200 голов

Table 3.Economic effect of implementing optimized area standards for a 200-head horse breeding enterprise

Показатель	Устаревшие нормативы	Современные нормативы	Экономический эффект
Общая площадь конюшен, м²	2800	2520	Снижение на 280 м² (10%)
Стоимость строительства 1 м², руб.	25 000	25 000	–
Капитальные затраты на строительство конюшен, млн руб.	70,0	63,0	Экономия 7,0 млн руб.
Годовые затраты на отопление, тыс. руб.	3000	2700	Экономия 300 тыс. руб./год
Снижение трудозатрат на уборку помещений, чел.-час/сут	16	14	Экономия 2 чел.-час/сут

Научно обоснованы параметры микроклимата: оптимальная температура воздуха +10-+16 °С, относительная влажность 60-70%, скорость движения воздуха 0,1-0,3 м/с, норматив воздухообмена 40-60 м³/ч на 100 кг живой массы лошади. Соблюдение данных параметров

снижает заболеваемость лошадей респираторными и дерматологическими заболеваниями на 15-20%. [15, 16].

Обсуждение. Методология комплексной оценки благополучия лошадей, оценка благополучия лошадей должна базироваться на специализированном подходе, интегрирующем ресурсоориентированные (технологические) и животные (биологические) индикаторы. В основе разработанного нами инструмента лежит адаптация методологии европейского протокола AWIN (Animal Welfare Indicators) [6, 7], которая позволяет объективизировать условия среды и физиологический статус животных при технологическом проектировании и эксплуатации конюшен.

Для комплексной оценки благополучия лошадей автором предложен интегральный показатель – Общий индекс благополучия (Welfare Score, WS), разработанный на основе адаптации методологических принципов протокола AWIN (Animal Welfare Indicators) и системы Welfare Quality с учетом специфики технологического проектирования коневодческих предприятий в Российской Федерации. Математическая модель индекса имеет следующий вид:

$$WS = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n} S_i}{2 \cdot n}\right) \cdot 100\%,$$

где:

- WS – Общий индекс благополучия, %;
- S_i – балльная оценка *i*-го критерия принимает значения:
  - 0 баллов – неудовлетворительное состояние/нарушение норм;
  - 1 балл – удовлетворительное состояние/соответствие минимальным нормативам;
  - 2 балла – хорошее состояние/соответствие современным стандартам благополучия;
- n – общее количество оцениваемых критериев в выборке;
- 2·n – максимально возможная сумма баллов (нормировочный коэффициент для перевода значения в процентную шкалу).

Структура оцениваемых критериев.

Методика разделяет критерии на две укрупненные группы, что позволяет выявлять как ошибки технологического проектирования, так и нарушения зоотехнического менеджмента:

1. Ресурсоориентированные (инженерно-технологические) параметры:

- параметры микросреды: соответствие площади денника биометрическим данным лошади (свобода движения), качество и толщина подстилочного материала (≥ 15 см, отсутствие аммиака), параметры микроклимата (температура +10…+16 °С, влажность 60–70%, концентрация CO_2 и NH_3 в пределах ПДК), кратность воздухообмена;
- организация пространства: наличие и доступность выгульных площадок (паддоков), освещенность (естественная и искусственная), эргономика кормушек и поилок.

2. Животные (биологические и поведенческие) индикаторы:

- Физиологический статус: упитанность (Body Condition Score, BCS), состояние кожного и волосяного покрова, наличие травм или патологий копыт.
- Этологические маркеры: наличие или отсутствие стереотипного поведения (крючница, качка, заглатывание воздуха), уровень социальной адаптации, реакция на человека (индекс страха).

Интерпретация результатов.

Шкала WS от 0 до 100% имеет четкую градацию для принятия инженерных и управленческих решений:

- 0-40% (критический уровень): условия содержания не соответствуют базовым ветеринарно-санитарным нормам, высок риск развития респираторных, ортопедических заболеваний и хронического стресса. Требуется немедленная реконструкция или изменение технологии содержания;
- 41-70% (допустимый уровень): параметры среды соответствуют минимальным нормативам, однако не обеспечивают реализацию видоспецифического поведения. Необходима оптимизация (например, увеличение площади выгулов, модернизация систем вентиляции);
- 71-100% (оптимальный уровень): условия содержания соответствуют концепции «пяти свобод» и современным международным стандартам. Обеспечивается максимальная продуктивность и репродуктивная функция.

Преимущества методики для проектирования

Применение индекса WS на стадии технологического проектирования позволяет перевести субъективные требования к «гуманному содержанию» в язык точных инженерных расчетов. Интеграция данной методики в нормативную базу дает проектировщикам инструмент для верификации объемно-планировочных решений (например, обоснования увеличения высоты потолков или площади световых проемов) до начала капитального строительства, что в конечном итоге снижает риски браковки животных и повышает экономическую устойчивость предприятия.

Адаптация международного опыта к российским условиям требует учета климатических особенностей: в северных регионах необходима стойловая система с энергоэффективными решениями, в южных регионах преимущественно пастбищная или стойлово-пастбищная система [17]. Разработанные нормативы площадей соответствуют рекомендациям Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединенных Наций и учитывают анатомо-морфологические особенности различных пород.

Экономическая эффективность применения современных нормативов подтверждена расчетами: снижение капитальных затрат на 10% и эксплуатационных расходов на 20–25% при одновременном повышении продуктивности животных за счет снижения стресса и улучшения кормоиспользования. Полученные результаты согласуются с современными отечественными исследованиями, подтверждающими рост рентабельности коневодческих предприятий на 8-12% при внедрении ресурсосберегающих и цифровых технологий управления стадом [18].

Особое внимание уделено проектированию для мелких форм хозяйствования. Для них разработаны упрощенные решения с минимальными капитальными вложениями: навесы вместо капитальных зданий, мобильные системы кормления и поения, минимальные санитарно-защитные зоны. Это создает условия для вовлечения мелких производителей в устойчивые товарные цепочки.

Таким образом, проведенный анализ демонстрирует, что интеграция принципов благополучия животных в технологическое проектирование перестает быть исключительно зоотехнической задачей и становится ключевым фактором инженерно-экономической оптимизации. Адаптация международных стандартов (протокол AWIN, директивы ЕС) к российским климатическим и структурным особенностям отрасли позволяет сформировать сбалансированную нормативную базу. Она обеспечивает синергетический эффект: с одной стороны, гарантирует создание среды для реализации видоспецифического поведения и

снижения стресса у животных, с другой – формирует основу для рационального использования площадей и снижения эксплуатационных затрат. Именно такой комплексный подход критически важен для устойчивого развития как крупных предприятий, так и подавляющего большинства мелких форм хозяйствования.

Выводы. 1) Устаревший нормативный документ не соответствует современным требованиям к проектированию коневодческих предприятий и требует замены на документ, учитывающий благополучие животных, энергоэффективность и цифровизацию.
2) Научно обоснованные нормативы площадей и микроклимата обеспечивают снижение капитальных затрат на 10% и заболеваемости лошадей на 15-20%. 3) Внедрение современных нормативов способствует достижению целевых показателей Стратегии развития коневодства РФ: рост поголовья до 1,6 млн голов, в том числе. заводских пород до 40 тыс. голов. 4) Необходима разработка региональных модификаций нормативов с учетом климатических особенностей и специфики форм хозяйствования, что позволит повысить доступность современных технологий для 92% хозяйств отрасли. 5) Применение методики комплексной оценки благополучия лошадей позволит повысить качество проектирования и эксплуатации коневодческих предприятий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Лопаева Н. Л. Коневодство – содержание племенных кобыл // Современные аспекты производства и переработки продукции АПК: сб. матер. круглого стола (Екатеринбург, 07 ноября 2023 года). Екатеринбург: Уральский государственный аграрный университет. 2023. С. 228-232. EDN: HPPXBL

2. Стародумов М. И., Рыгина Е. С. Историческое значение отрасли коневодства // Коневодство и конный спорт. 2025. № 4. С. 30-34. https://doi.org/10.25727/HS.2025.4.60319 EDN: EFJENV

3. Мыратдурдыев Н., Гулов Ю. Коневодство и сельское хозяйство // Академическая публицистика. 2025. № 2-2. С. 77-80. EDN: TAYKON

4. Узденова М. А. Применение инновационных технологий в животноводстве // Научный форум: Экономика, управление и цифровые технологии в АПК-2024. Сб. тр. Межд. науч.-практ. студ. конф. (Москва, 20 ноября 2024 г.). М.: Российский государственный аграрный университет. 2024. Т. 3. С. 149-152. EDN: NCAOZT

5. Калашников В. В., Ковешников В. С. Тенденции и перспективы развития коневодства в России // Коневодство и конный спорт. 2010. № 3. С. 3-8. EDN: OWLDHH

6. Маркин С. С., Зиновьева С. А., Козлов С. А. Анализ современных представлений о благополучии лошадей и критериях его оценки // Коневодство и конный спорт. 2025. № 5. С. 4-7. https://doi.org/10.25727/HS.2025.5.60201 EDN: FQVBLM

7. Маркин С. С., Зиновьева С. А., Козлов С. А. Оценка благополучия лошадей с использованием некоторых критериев протокола AWIN (Animal Welfare Indicators) // Коневодство и конный спорт. 2025. № 6. С. 10-12. https://doi.org/10.25727/HS.2025.6.60105 EDN: WXGATL

8. Оразов М., Чарыбердиев К., Елдашов Г. Научные исследования в области коневодства // Инновационная наука. 2025. № 9-1. С. 50-51. EDN: CPHKES

9. Маркин С. С., Зиновьева С. А., Козлов С. А. Оценка благополучия лошадей, содержащихся в конюшенных условиях // Коневодство и конный спорт. 2025. № 5. С. 8-10. https://doi.org/10.25727/HS.2025.5.60202 EDN: MMEUFP

10. Калашников В. В., Зайцев А. М., Дубровин А. В., Блохина Н.В., Калашников Р.В. Современная система племенного коневодства России и перспективы ее развития // Коневодство и конный спорт. 2021. № 5. С. 4-9. https://doi.org/10.25727/HS.2021.5.60361 EDN: LPWLBB

11. Зезин Н. Н., Митин А. Н. О необходимости ускорения внедрения современных технологий, влияющих на повышение эффективности сельскохозяйственного производства // Агропродовольственная политика России. 2024. № 5(112). С. 18-25. https://doi.org/10.35524/2227-0280_2024_05_18 EDN: NAMYUA

12. Мюлкиев Б., Чарыбердиев К., Елдашов Г. Наука о лошадях: Иппология // Инновационная наука. 2025. № 9-1. С. 48-50. EDN: TDNYZV

13. Драганов И. Ф., Макарцев Н. Г., Калашников В. В. Епифанов В.Г., Адушинов Д.С., Осищер Б.Р., Менькин В.К., Подколзина Т.М., Ушаков А.С., Бурякова М.А., Буряков Н.П. Кормление животных: учебник для студентов высших учебных заведений. М.: Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К. А. Тимирязева. 2011. Т. 1. 341 с. EDN: WUMTKW

14. Архипов А. Г., Горбачев М. И., Косогор С. Н., Моторин О.А., Суворов Г.А., Труфляк Е.В. Цифровая трансформация сельского хозяйства России. М.: Росинформагротех. 2019. 80 с. EDN: TKKKIH

15. Шабикова Г. А. Вентиляция животноводческих помещений // Наука и новые технологии. 2013. № 8. С. 6-7. EDN: WADMCZ

16. Суходольская И. В., Юрьева И. Б. Может ли коневодство в России быть эффективным? // Эффективное животноводство. 2020. № 9(166). С. 128-131. https://doi.org/10.24412/cl-33489-2020-9-128-131 EDN: KKYYMQ

17. Араева А. К., Табирисова Р. Т. Методологические основы организации бухгалтерского учета на малых предприятиях коневодства по международным стандартам // Вопросы устойчивого развития общества. 2021. № 4. С. 18-22. https://doi.org/10.34755/IROK.2021.13.92.024 EDN: AJZYNG

18. Сулейманов О. И., Подобаев В. А., Алексеева Е. И. Эффективность внедрения цифровых технологий в племенное коневодство России // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2023. № 2(71). С. 95-104. https://doi.org/10.24412/2078-1318-2023-2-95-104 EDN: HYUPEA

REFERENCES

1. Lopaeva N. L. Horse breeding – maintenance of breeding mares. In: Modern Aspects of Production and Processing of Agricultural Products. Proceedings of the Round Table (Yekaterinburg, November 07, 2023). Yekaterinburg: Ural State Agrarian University. 2023: 228-232. (In Russ.) EDN: HPPXBL

2. Starodumov M. I., Rygina E. S. The historical significance of the horse breeding industry. Konevodstvo i konnyy sport = Horse Breeding and Equestrian Sports. 2025;(4):30-34. (In Russ.) https://doi.org/10.25727/HS.2025.4.60319 EDN: EFJENV

3. Myratdurdyev N., Gulov Yu. Horse breeding and agriculture. Akademicheskaya publitsistika = Academic Journalism. 2025;2(2):77-80. (In Russ.) EDN: TAYKON

4. Uzdenova M. A. Application of innovative technologies in livestock farming. In: Scientific Forum: Economics, Management and Digital Technologies in AIC-2024: Proc. Int. Sci. Prac.

Student Conf. (Moscow, November 20, 2024). Moscow: Russian State Agrarian University, 2024;3:149-152. (In Russ.) EDN: NCAOZT

5. Kalashnikov V. V., Koveshnikov V. S. Development tendencies and perspective in horse breeding in Russia. Konevodstvo i konnyy sport = Horse Breeding and Equestrian Sports. 2010;3:3-8 (In Russ.) EDN: OWLDHH

6. Markin S. S., Zinovieva S. A., Kozlov S. A. Analysis of modern ideas about the welfare of horse and criteria for its assessment. Konevodstvo i konnyy sport = Horse Breeding and Equestrian Sports. 2025;5:4-7. (In Russ.) https://doi.org/10.25727/HS.2025.5.60201. EDN: FQVBLM

7. Markin S. S., Zinovieva S. A., Kozlov S. A. Evaluation of equine welfare using some criteria of the AWIN protocol (Animal Welfare Indicators). Konevodstvo i konnyy sport = Horse Breeding and Equestrian Sports. 2025;6:10-12. (In Russ.) https://doi.org/10.25727/HS.2025.6.60105 EDN: WXGATL

8. Orazov M., Charyberdiyev K., Yeldashov G. Research in horse breeding. Innovatsionnaya nauka = Innovation Science. 2025;9(1):50-51. (In Russ.) EDN: CPHKES

9. Markin S. S., Zinovieva S. A., Kozlov S. A. Assessment of the welfare of horses kept in stable conditions. Konevodstvo i konnyy sport = Horse Breeding and Equestrian Sports. 2025;5:8-10. (In Russ.) https://doi.org/10.25727/HS.2025.5.60202 EDN: MMEUFP

10. Kalashnikov V. V., Zaitsev A. M., Dubrovin A. V., Blokhina N.V., Kalashnikov R.V. The modern system of pedigree horse breeding in Russia and prospects for its development. Konevodstvo i konnyy sport = Horse Breeding and Equestrian Sports. 2021;5:4-9. (In Russ.) https://doi.org/10.25727/HS.2021.5.60361 EDN: LPWLBB

11. Zezin N. N., Mitin A. N. On the need to accelerate the implementation of modern technologies that affect the increase in the efficiency of agricultural production. Agroprodovolstvennaya politika Rossii = Agro-Food Policy in Russia. 2024;5(112):18-25. (In Russ.) https://doi.org/10.35524/2227-0280_2024_05_18 EDN: NAMYUA

12. Mulkiyev B., Charyberdiyev K., Yeldashov G. The science of horses: Hippology. Innovatsionnaya nauka = Innovation Science. 2025;9(1):48-50. (In Russ.) EDN: TDNYZV

13. Draganov I. F., Makartsev N. G., Kalashnikov V. V., Epifanov V.G., Adushinov D.S., Ovsisher B.R., Menkin V.K., Podkolzina T.M., Ushakov A.S., Buryakova M.A., Buryakov N.P. Feeding of Animals: Textbook for students of higher educational institutions. Moscow: Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy. 2011. Vol.1. 341 p. (In Russ.) EDN: WUMTKW

14. Arkhipov A. G., Gorbachev M. I., Kosogor S. N., Motorin O.A., Suvorov G.A., Truflyak E.V. Digital transformation of agriculture in Russia. Moscow: Rosinformagrotekh, 2019. 80 p. (In Russ.) EDN: TKKKIH

15. Shabikova G. A. Ventilation of livestock buildings. Nauka i novye tekhnologii = Science and New Technologies. 2013;8:6-7. (In Russ.) EDN: WADMCZ

16. Sukhodolskaya I. V., Yurieva I. B. Can horse breeding in Russia be effective? Effektivnoe zhivotnovodstvo = Efficient Animal Husbandry. 2020;9(166):128-131. (In Russ.) https://doi.org/10.24412/cl-33489-2020-9-128-131 EDN: KKYYMQ

17. Araeva A. K., Tabirisova R. T. Methodological foundations of the organization of accounting at small enterprises of horse breeding according to international standards. Voprosy ustoychivogo razvitiya obshchestva = Issues of Sustainable Development of Society. 2021;4:18-22. (In Russ.) https://doi.org/10.34755/IROK.2021.13.92.024 EDN: AJZYNG

18. Suleymanov O. I., Podobaev V. A., Alekseeva E. I. Efficiency of digital technology implementation in Russian horse breeding. Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Izvestiya Saint-Petersburg State Agrarian University. 2023;2(71):95-104. (In Russ.) https://doi.org/10.24412/2078-1318-2023-2-95-104 EDN: HYUPEA

Об авторе:	**About the author:**
Давыдов Александр Александрович, научный сотрудник отдела разработки нормативно-методической документации для проектирования объектов АПК, ФГБНУ «Росинформагротех». 141261, Московская область, р.п. Правдинский, ул. Лесная, д. 60 a.davydov@rosinformagrotech.ru +7 (996) 977-28-27 ORCID: https://orcid.org/0009-0009-4885-0075	**Alexander A. Davydov, r**esearcher, Department of Regulatory and Methodological Documentation Development for APC Facility Design, Federal State Budgetary Scientific Institution «Rosinformagrotech». 141261, Moscow Region, Pravdinsky, Lesnaya Str., 60a.davydov@rosinformagrotech.ru +7 (996) 977-28-27 ORCID: https://orcid.org/0009-0009-4885-0075
Заявленный вклад автора Автор выполнил весь проект	**Author's contribution** Single 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 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: 02.03.2026	**Received:** 02.03.2026
Одобрена после рецензирования: 10.09.2026	**Approved after reviewing:** 10.09.2026
Принята к публикации: 11.09.2026	**Accepted for publication:** 11.09.2026

Научная статья
УДК 636.2:637.1. DOI 10.24412/2713-2641-2026-3128-118-128

РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ КАК ЭЛЕМЕНТ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ В ПРОИЗВОДСТВЕ МОЛОЧНОЙ ПРОДУКЦИИ

Людмила Алексеевна Неменущая

Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса (ФГБНУ Росинформагротех), р. п. Правдинский, Московская область, Россия
nemenuschaya@rosinformagrotech.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7251-1545

Аннотация. Целью исследования было выявление ресурсосберегающих, биотехнологий и наилучших доступных технологий, перспективных для применения в производстве органической молочной продукции. Исследование проводилось с использованием аналитического, сравнительного и информационно-логического методов анализа информации из открытых источников. В качестве материалов информационно-аналитического мониторинга были использованы данные профильных общественных и научных организаций, компаний-производителей, печатные издания, нормативная документация и интернет-ресурсы. В результате исследования предложены ресурсосберегающие технологии, биотехнологии и наилучшие доступные технологии, реализация которых не противоречит требованиям, предъявляемым к производству органической продукции. Для этого проведен сравнительный анализ предприятий, производящих и перерабатывающих органическое молоко, на основе статистических данных за 2025 год, анализ перечня наилучших доступных технологий для молочной промышленности и их характеристик из информационно-технических справочников (ИТС-43 и ИТС-45). В результате исследования предложены в качестве перспективных для внедрения в производство органической молочной продукции: ресурсосберегающие технологии переработки пахты и сыворотки – биотехнологии сквашенных напитков с наполнителями и без них; наилучшая доступная технология –производство кисломолочных продуктов, сыра с использованием культур прямого внесения (при ее реализации из-за исключения затрат на работу оборудования для приготовления 1 т производственной закваски снижается расход пара на 0,13 Гкал, холода – на 0,083 Гкал, электроэнергии – на 0,46 тыс. руб.); использование систем экологического менеджмента, соответствующих требованиям ГОСТ Р ИСО 14001-2016, ИСО 14001; биоферментация в установках камерного типа и внесение твердых органических удобрений; технологические и технические решения, применяемые в качестве НДТ для очистки сточных вод; переработка навоза и органических отходов (активное компостирование, ускоренное компостирование, переработка насекомыми). Установлено, что ресурсосбережение обеспечивает ускоренная переработка твердого навоза, реализуемая с помощью специального оборудования, разработанного в ИАЭП филиале ФГБНУ ФНАЦ ВИМ. При ее применении снижаются эмиссии в атмосферу на 10% за счет сохранности азота, сокращения эксплуатационных затрат на транспортировку органического удобрения на 47%. Системное применение биотехнологий и использование НДТ в органическом молочном производстве создаёт условия для устойчивого развития

отрасли, сочетая экономическую эффективность, ресурсосбережение и экологическую безопасность.

Ключевые слова: ресурсосбережение, молоко, качество, продукция, повышение, НДТ

Для цитирования: Неменущая Л.А. Ресурсосбережение как элемент системы управления качеством в производстве молочной продукции // АгроЭкоИнженерия. 2026. №.3(128) С.118-129 https://doi.org/10.24412/2713-2641-2026-3128-118-128

Благодарности: Работа выполнена в рамках темы НИР 1.6-26 Государственного задания ФГБНУ «Росинформагротех» № 082-00120-26-00 на 2026 год и на плановый период 2027 и 2028 годов.

Research article
Universal Decimal Code 636.2:637.1.

RESOURCE SAVING AS AN ELEMENT OF THE QUALITY MANAGEMENT SYSTEM IN DAIRY PRODUCTION

Ljudmila A. Nemenushchaya

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
nemenuschaya@rosinformagrotech.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7251-1545

Abstract. The aim of the study was to identify resource-saving, biotechnologies and best available techniques (BATs), which show promise in organic dairy production. The study used analytical, comparative, and information-logical methods of analyzing information from publicly available sources. Information and analytical monitoring was applied to the data from specialized public and scientific organizations, manufacturing companies, printed publications, regulatory documentation, and online resources. The study proposed resource-saving technologies, biotechnologies, and BATs, whose implementation meets the requirements of organic production. To achieve this, statistical data for 2025 on the enterprises producing and processing organic milk were analyzed alongside the list of BATs for the dairy industry and BAT characteristics from Information and Technical Reference Books ITR-43 and ITR-45. The study proposed the biotechnology of fermented drinks with and without additives as a promising resource-saving method for processing buttermilk and whey. The study also suggested several BATs for the use in organic dairy production. They include making of fermented milk products and cheese using Direct Vat Set (DVS) cultures; introduction of environmental management systems that meet the requirements of State Standard GOST R ISO 14001-2016 and ISO 14001; fermentation of manure in chamber installations and field application of resulting solid organic fertilizers; advanced technological and technical solutions identified as BATs for wastewater treatment; active and accelerated composting of manure and organic waste; and insect-based bioconversion of manure. As previously established, resource conservation was ensured by the accelerated processing of solid manure using special equipment designed at IEEP - branch of FSAC VIM. This method reduced atmospheric emissions by 10% owing to preventing of nitrogen loss and provided a 47% reduction in operating costs for the transportation of organic fertilizers. The study concluded that systematic application of biotechnology and BATs in organic dairy production would foster sustainable

development of the industry by integrating economic efficiency, resource conservation and environmental safety.

Keywords: resource conservation, milk, quality, product, improvement, BAT

For citation: Nemenushchaya L.A. Resource conservation as an element of the quality management system in dairy production. AgroEcoEngineering. 2026;3(128):118-129 (In Russ.) https://doi.org/10.24412/2713-2641-2026-3128-118-128

Acknowledgements. The work was carried out within the framework of the research topic 1.6-26 of the State Assignment of Rosinformagrotech Federal State Budgetary Scientific Institution No. 082-00120-26-00 for 2026 and for the planning period of 2027 and 2028.

Введение. Биологизация аграрного сектора является важным направлением развития российского сельского хозяйства, способствующим решению глобальных проблем продовольственной безопасности и устойчивого развития страны, в том числе и за счет увеличения производства органической продукции. Современные экономическая ситуация и аграрная политика требуют применения технологий, обеспечивающих оптимизацию, ресурсосбережение и экологичность технологических процессов производства продуктов питания, у потребителей возрастает запрос на качественные чистые от химического загрязнения продукты, последовательно формируется рынок производителей и покупателей органической продукции. Хотя переход на органическое производство связан со значительными затратами, он обеспечивает ряд, в том числе и экономических, преимуществ для производителя, особенно если последний использует технологии, отличающиеся ресурсосберегающими показателями [1], экологичные, относящиеся к наилучшим доступным технологиям (НДТ) [2, 3, 4]. Получаемая органическая продукция положительно влияет на возможность увеличения объемов экспорта и существенного повышения рентабельности предприятия-производителя, она находит своего потребителя, несмотря на более высокую цену реализации [5, 6]. Опыт стран с развитым органическим рынком показал, что в сфере производства органических продуктов получение органического молока является перспективным направлением, поскольку среди общего объема переработки органической животноводческой продукции, молоко и молочная продукция занимают ведущую позицию. В структурном соотношении отраслей органического сельского хозяйства, самый большой процент приходится на растениеводство (около 75%), животноводство занимает около 8%, но несмотря на это в произведенной продукции объём переработки мяса и молока составляет 30-40% всего органического рынка [5]. Производителям органического молока и продуктов его переработки полезно иметь информацию об актуальных, перспективных, доступных и экономически выгодных путях дальнейшей экологизации производства через переработку и использование отходов, побочного и вторичного сырья, внедрение НДТ. Некоторые элементы наилучших доступных технологий уже применяются в практическом органическом производстве, например, применение культур прямого внесения при выпуске кисломолочной продукции. При оформлении необходимой документации производитель сможет получить ряд экономических, экологических и стратегических преимуществ, которые поспособствуют устойчивому развитию бизнеса и повышению его конкурентоспособности. Предприятия, внедряющие НДТ, могут рассчитывать на налоговые льготы, ускоренную амортизацию оборудования и др., переработка отходов и вторичного, побочного сырья обеспечит ресурсосбережение в сокращении их количества и получении добавленного продукта.

Проведенное исследование будет содействовать научно-информационному обеспечению данного направления.

Цель исследования. Выявление ресурсосберегающих, биотехнологий и наилучших доступных технологий, в перспективе возможных для применения в производстве органической молочной продукции.

Материалы и методы. Исследование проводилось с использованием аналитического, сравнительного и информационно-логического методов анализа информации из открытых источников. В качестве материалов информационно-аналитического мониторинга были использованы данные профильных общественных и научных организаций, компаний-производителей, печатные издания, нормативная документация и интернет-ресурсы. Для определения структуры произведенной продукции переработки органического животноводства в молочном секторе были проанализированы данные за 2025 год обо всех хозяйствах, перерабатывающих органическое молоко, опубликованные в последнем издании Органического атласа России, составленного по реестру Минсельхоза России о действующих организациях, выпускающих органическую продукцию[50]. Были рассмотрены все организации, представленные в атласе, из них отобраны производящие органическое молоко, а у последних выделена продукция переработки органического молока при ее наличии, а также образующиеся при этом отходы, вторичное и побочное сырье. Отмеченные как перспективные ресурсосберегающие технологии были выявлены в предыдущих исследованиях автора [5]. Выбор перспективных НДТ основывался на их характеристиках, показанных в информационно-технических справочниках НДТ, прежде всего, применимость на любом предприятии, отсутствие противоречий с нормативной документацией, регламентирующей органическое производство.

Результаты. На основе проведенных автором статистической обработки, анализа и обобщения информационных материалов специализированных организаций органического животноводства, их практического опыта, описанного в открытых информационных и интернет ресурсах [5, 6, 7, 8, 9] установлено, что на предприятиях, осуществляющих свою деятельность по принципам органического сельского хозяйства, часто используются технологии замкнутого цикла от производства сырья до его переработки, что способствует обеспечению качества конечной продукции, повышению объемов ее реализации и устраняет необходимость поиска внешних ресурсов для обеспечения норм органического законодательства.

Также выявлено, что основная продукция переработки молока в действующих органических хозяйствах представлена следующими позициями (рис.1).

[50]Органический атлас России. Союз органического земледелия. 2025. [Электронный ресурс]. URL: https://soz.bio/wp-content/uploads/2025/08/organicheskiy-atlas-rossii-2025-1-compressed.pdf (дата обращения 10.02.26)



Рис. 1. Структурный состав основной продукции переработки молока
Fig.1. Structural composition of the main products of milk processing

Эти данные были использованы в дальнейшем исследовании при выборе видов продукции переработки и определении основных видов образующихся отходов, вторичного и побочного сырья.

Обсуждение. При производстве органического молока и молочной продукции производители обычно применяют традиционные технологии с соблюдением требований нормативной документации по органическому сельскому хозяйству. Поэтому организациям, перерабатывающим органическое молоко, присущи проблемы, характерные для всех перерабатывающих производств, такие как необходимость сокращения отходов, их утилизации или переработки, ресурсосбережения, оптимизации производственных процессов. Для решения данных проблем могут быть использованы НДТ, применение которых соответствует идеологии органического сельского хозяйства и обеспечивает экономические преимущества за счет предоставления налоговых льгот и экономии ресурсов. Существующий справочник ИТС 45 НДТ, к которому относится, в том числе, и производство молочной продукции [10], содержит перечень рекомендованных к внедрению НДТ. После изучения характеристик, применяемых при производстве молока и молочных продуктов технологических процессов, оборудования, технических способов, методов, установленных технологических показателей, соответствующих НДТ, были выделены две технологии перспективные для применения и способные содействовать ресурсосбережению в переработке органического молока [10-12].

Первая НДТ относится к производству кисломолочных продуктов, сыра с использованием культур прямого внесения. При ее реализации из-за исключения затрат на работу оборудования для приготовления 1 т производственной закваски, снижается расход пара на 0,13 Гкал; холода – на 0,083 Гкал, электроэнергии – на 0,46 тыс. руб. Данная технология общеприменима для организаций, производящих кисломолочные продукты (кроме продуктов на основе естественных ассоциаций) и сыр, есть примеры организаций, перерабатывающих органическое молоко, где используются готовые культуры прямого внесения, например, такие как закваски торговой марки «ЗДОРОВЕЕВО» (рис.2).

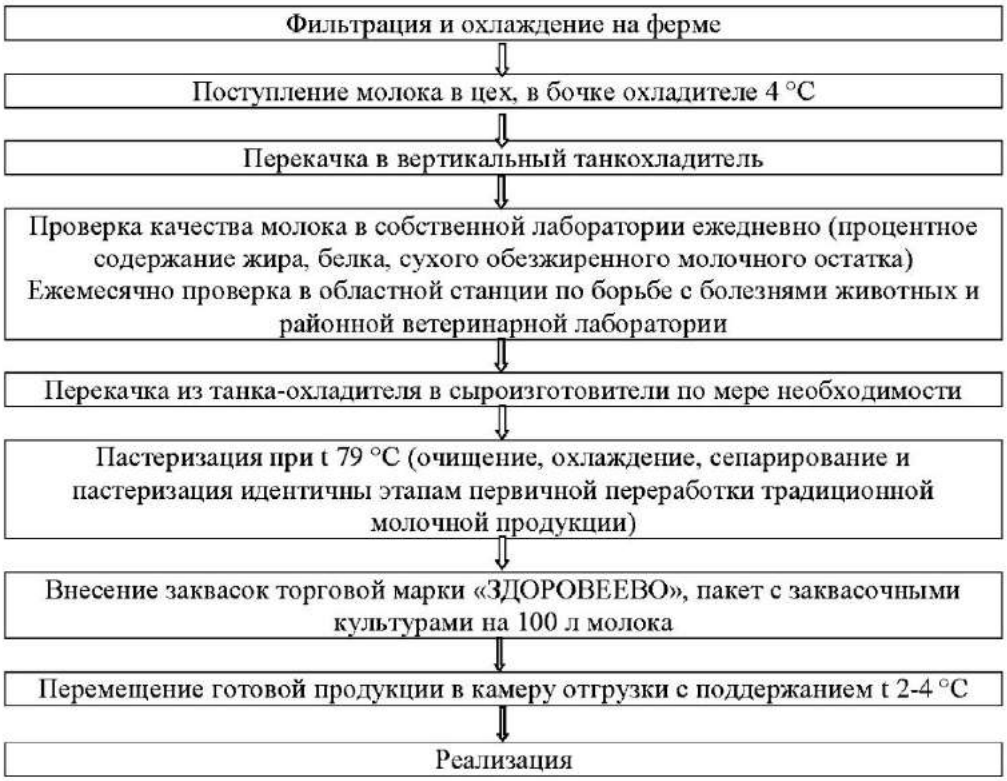


Рис. 2. Технологическая схема производства органического сыра (составлена автором на основе данных: интервью с Эдуардом Почивалиным генеральным директором ООО «Богимовские сыроварни» [Электронный ресурс]. – URL: https://soz.bio/intervyu-s-yeduardom-pochivalinym/ (дата обращения: 11.02.2026)

Fig. 2. Flow chart for organic cheese production (compiled by the author based on the data from an interview with Eduard Pochivalin, CEO of Bogimov Cheese Factory LLC [online]. URL: https://soz.bio/intervyu-s-yeduardom-pochivalinym/ (accessed 11.02.2026)

Вторая рассматриваемая НДТ обеспечивает использование систем экологического менеджмента, соответствующих требованиям ГОСТ Р ИСО 14001-2016[51], ИСО 14001[52]. Ее внедрение сокращает негативное воздействие на окружающую среду, оптимизирует производственные процессы. НДТ общеприменима для предприятий, перерабатывающих молоко. Реализуется созданием и соблюдением экологической политики, направленной на контроль, регулирование и минимизацию экологических воздействий предприятия на природную среду с периодическим подтверждением соответствия действующему стандарту в области системы экологического менеджмента [10]. Ресурсосбережение обеспечивается за счет более рационального использования энергии и ресурсов, в том числе направляемых на природоохранные мероприятия, уменьшение образования отходов, издержек, связанных с воздействием предприятия на окружающую среду. Хотя внедрение потребует увеличения расходов на проведение мероприятий связанных с разработкой программ экологической политики, а также материального обеспечения ее реализации и контроля, данная технология может считаться перспективной поскольку все предприятия, работающие по принципам

[51]ГОСТ Р ИСО 14001-2016. Системы экологического менеджмента. Требования и руководство по применению. [Электронный ресурс]. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200134681 (дата обращения 10.02.2026)

[52] ISO 14000. Менеджмент окружающей среды. [Электронный ресурс]. URL: https://www.iso.org/ru/iso-14001-environmental-management.html (дата обращения 10.02.2026)

органического сельского хозяйства, уже реализуют регламентированную экологическую политику, не противоречащую требованиям ГОСТ Р ИСО 14001-2016.

Анализ структуры получаемой продукции сектора переработки сырья молочного животноводства (рис.1), выявил, что основными отходами и вторичным сырьем будут сыворотка и пахта, получаемые при производстве, творога, сыра, масла. На основании проведенных исследований имеющихся разработок переработки данных отходов и вторичного сырья установлено, что из них для органических производств перспективно при помощи биотехнологий изготавливать сквашенные напитки с наполнителями и без них, биопахту (ВНИИМС - филиал ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН). Для последней клинические испытания в Московском НИИ эпидемиологии и микробиологии им. Г.Н. Габричевского подтвердили лечебно- профилактический эффект при желудочно- кишечных заболеваниях и дисбактериозах [5-7].

Ресурсосберегающие преимущества обеспечит внедрение перспективной технологии кисло-сливочного масла пониженной жирности. Прежде всего, это сокращение объемов необходимого молока-сырья (в сравнении с Крестьянским маслом), которое позволяет изготовить дополнительно 0,3 т/т продукта; снижение объемов образования вторичных продуктов (обезжиренного молока и пахты), отсутствие потребности в специальном оборудовании; экономический эффект более 37 руб./кг готового продукта [10].

К перспективным направлениям сокращения объемов не переработанной сыворотки для органических хозяйств относится технология полутвердых сыров пониженной жирности (комплект технической документации на полутвердые сыры диетические в ассортименте – СТО ВНИИМС 058-2023 и ТИ по производству[53]). Особенность технологии заключается в использовании подобранного видового состава бактериальной закваски. Внедрение технологии позволит снизить потери жира с сывороткой, что обеспечивает снижение энергетических затрат на ее сепарирование на 10%, переработка полученной сыворотки не требует дополнительной обработки сырья, высвободившаяся часть жировой фракции сырья может быть направлена на производство других продуктов, внедрение не требует дополнительных капиталовложений и способствует снижению энергоресурсов на 0,8 кВтч/л перерабатываемого на сыр молока. Таким образом, предприятия, заинтересованные в сокращении объемов отходов и неиспользуемого вторичного молочного сырья, могут рассмотреть возможность внедрения подобных технологий [10-12].

Поскольку большинство переработчиков органического молока являются одновременно и его производителями, для ресурсосбережения необходимы перспективные технологии переработки навоза и других, образующихся в процессе содержания животных, органических остатков. Для выбора перспективных биотехнологий переработки данных отходов и побочного сырья были проанализированы открытые информационные источники по тематике исследований, содержание информационно-технических справочников по НДТ ИТС-41, ИТС-42 и ИТС-43, нормативной документации, регламентирующей органическое сельское хозяйство. В результате анализа для переработки навоза и других органических отходов в качестве перспективных для применения предлагается ускоренная переработка твердого навоза, реализуемая с помощью специального оборудования, разработанного в ИАЭП - филиале ФГБНУ ФНАЦ ВИМ [13]. Этапы технологии включают в себя подкисление, флокуляцию и разделение навоза на фракции в декантерной центрифуге,

[53] Всероссийский научно-исследовательский институт маслоделия и сыроделия (ВНИИМС). Нормативные документы. [Электронный ресурс]. URL: https://vniims.info/products/7.html (дата обращения 10.02.2026)

ректификацию жидкой фракции, пассивное компостирование твердой фракции, длительное выдерживание жидкой фракции. Технология позволяет получать твердое органическое удобрение, концентрированную жидкость (аммиачную воду) и жидкость для удобрительных поливов. Внедрение технологии помогло снизить эмиссии в атмосферу на 10% за счет сохранности азота, сократить эксплуатационные затраты на транспортировку органического удобрения на 47% посредством концентрации питательных веществ в меньшем объеме, повысить плодородие почв с помощью удобрительных поливов [14].

Востребованной для хозяйств, перерабатывающих органическое молоко, может стать технология нового поколения экологически безопасных моющих и дезинфицирующих средств для санитарной обработки оборудования для переработки молока. Использование разработанных композиций позволяет снизить нагрузку на очистные сооружения на 20-30%, что является их существенным экологическим преимуществом и обеспечивает общее снижение расхода средств примерно на 25 % [10].

Выводы. Проведённый анализ современных биотехнологий и НДТ демонстрирует их ключевую роль в формировании ресурсосберегающей модели переработки органического сырья в молочном производстве, в повышении качества и конкурентоспособности конечного продукта. Оптимизации производства молочных продуктов за счет экологизации и получения льгот будет содействовать применение НДТ в виде культур прямого внесения при изготовлении кисломолочных продуктов и сыров, при реализации которой из-за исключения затрат на работу оборудования для приготовления 1 т производственной закваски, снижается расход пара на 0,13 Гкал; холода – на 0,083 Гкал, электроэнергии – на 0,46 тыс. руб. Ресурсосбережение обеспечивают внедрение экологических регламентов, комплексной переработки вторичных ресурсов, побочного сырья и отходов. Например, ускоренная переработка твердого навоза, реализуемая с помощью специального оборудования, разработанного в ИАЭП - филиале ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, обеспечивает снижение эмиссии в атмосферу на 10% за счет сохранности азота, сокращение эксплуатационных затрат на транспортировку органического удобрения на 47% посредством концентрации питательных веществ, повышение плодородия почв с помощью удобрительных поливов. Таким образом, системное применение биотехнологий и использование НДТ в органическом молочном производстве создаёт условия для устойчивого развития отрасли, сочетая экономическую эффективность, ресурсосбережение и экологическую безопасность.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Коршик Т.С., Косикова Ю.А., Толкачева С.В., Кобяшова Е.А. Тенденции развития рынка органической молочной продукции // Евразийский Союз Ученых. Серия: экономические и юридические науки. 2021. № 5(86). С. 15-19. EDN: GMAYBA

2. Карнизенко М.А. Механизм государственной поддержки производства органического молока // Агрофорсайт. 2022. № 2(39). С. 46-52. EDN: ZOQSJA

3. Косарева О.А., Ситникова К.С. Безлактозное, органическое и растительное молоко, как альтернатива молоку цельному // Вестник Национального Института Бизнеса. 2024. №1(53). С. 125-128. EDN: GOATFS

4. Закревский В.В., Мелешкова И.В., Кордюкова Л.В., Подорванов А.А. Органические продукты питания - актуальное направление сельскохозяйственного производства // Экология и развитие общества. 2021. №2-3(36). С. 38-45. EDN: JBLIBK

5. Неменущая Л. А., Масловский С. А., Щеголихина Т. А., Манохина А.А., Осмоловский П.Д. Перспективные экологически безопасные технологии рециклинга животного сырья: Аналитический обзор. М.: Росинформагротех. 2024. 84 с. EDN: DXULIS

6. Бочкарева Ю.В., Неменущая Л.А., Белик М.А., Масловский С.А., Манохина А.А. Анализ опыта применения агробиотехнологий в органическом сельском хозяйстве. М.: Росинформагротех, 2025. 104 с. EDN: PNPVCD

7. Бочкарева Ю.В., Неменущая Л.А., Войтюк В.А., Рыжков Д.В., Алиев Ш.М., Любоведская А.А. Инструменты повышения эффективности ведения органического сельского хозяйства: аналитический обзор. М.: Росинформагротех. 2024. 92 с. EDN: QUHEZB

8. Ставцев А.Н., Брагинец Ю.Н., Хашир Б.О. Нормативно-правовое регулирование производства органического молока и продуктов его переработки // Экономика, труд, управление в сельском хозяйстве. 2022. №2(84). С. 20-28. EDN: YGKICC

9. Машлетова В.А, Вахрамова О.Г. Особенности производства и переработки органической молочной продукции // Материалы Всеросс. (национальной) науч.-практ. конф. с межд. участием, посвящённой 110-летию со дня рождения Ивана Сергеевича Кауричева (Калуга, 14 декабря 2023 г.). Калуга: ИП Якунина В.А. 2024. С. 24-28. EDN: NFAOCG

10. Информационно–технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 45. Производство напитков, молока и молочной продукции. 2024. №45. [Электронный ресурс]. URL: https://burondt.ru/NDT/NDTDocsDetail.php?UrlId=2278&etkstructure_id=1872 (дата обращения: 10.02.2026)

11. Мишуров Н. П., Коноваленко Л. Ю., Неменущая Л. А. Перспективные наилучшие доступные технологии в сфере переработки сельскохозяйственного сырья // Техника и оборудование для села. 2022. № 9(303). С. 22-27. https://doi.org/10.33267/2072-9642-2022-9-22-27 EDN: BHVTQC

12. Федоренко, В.Ф. О технической модернизации сельского хозяйства // Техника и оборудование для села. 2021. № 5(287). С. 2-6. https://doi.org/10.33267/2072-9642-2021-5-2-6 EDN: THAKTX

13. Брюханов А. Ю., Васильев Э. В., Шалавина Е. В., Охтилев М.Ю., Коромысличенко В.Н. Инструмент для мониторинга экологического состояния и устойчивого развития сельскохозяйственного производства // Техника и технологии в животноводстве. 2023. № 1(49). С. 78-84. https://doi.org/10.22314/27132064-2023-1-78 EDN: UKCKMG

14. Шалавина Е.В., Васильев Э.В., Папушин Э.А. Анализ эффективности технологии разделения навоза на фракции с последующей ректификацией жидкой фракции // Инженерные технологии и системы. 2023. № 33 (2). С. 237-255. EDN: KYGKWF

REFERENCES

1. Korshik T.S., Kosikova Yu.A., Tolkacheva S.V., Kobyashova E.A. Trends in the development of the organic dairy products market. Yevraziiskii Soyuz Uchenikh. Seriya: ekonomicheskie i yuridicheskie nauki = Eurasian Union of Scientists. Series: Economic and Legal Sciences. 2021; 5(86): 15-19 (In Russ.) EDN: GMAYBA

2. Karnizenko M.A. Current state of cattle breeding in Saratov Region. Agroforsait = Agroforesight. 2022;2(39):46-52. (In Russ.) EDN: ZOQSJA

3. Kosareva O.A., Sitnikova K.S. Lactose-free, organic and plant-based milk as an alternative to whole milk. Vestnik Natsionalnogo Instituta Biznesa = Bulletin of the National Institute of Business. 2024;1(53):125-128. (In Russ.) EDN: GOATFS

4. Zakrevsky V.V., Meleshkova I.V., Kordukova L.V., Podorvanov A.A. Organic food products are an actual direction of agricultural production. Ekologiya i razvitie obshchestva = Ecology and Development. 2021;2-3(36):38-45. (In Russ.) EDN: JBLIBK

5. Nemenushchaya L. A., Maslovsky S. A., Shchegolikhina T. A., Manokhina A.A., Osmolovskiy P.D. Promising environmentally friendly technologies for recycling animal raw materials: Analytical review. Moscow: Rosinformagrotech. 2024. 84 p. (In Russ.) EDN: DXULIS

6. Bochkareva Yu.V., Nemenushchaya L.A., Belik M.A., Maslovskii S.A., Manokhina A.A. Analysis of the best practices in the use of agrobiotechnologies in organic agriculture. Moscow: Rosinformagrotech. 2025. 104 p. (In Russ.) EDN: PNPVCD

7. Bochkareva Yu.V., Nemenushchaya L.A., Voytyuk V.A., Ryzhkov D.V., Aliev Sh.M., Lyubovedskaya A.A. Tools for improving the efficiency of organic agriculture: Analytical review. Moscow: Rosinformagrotech. 2024. 92 p. (In Russ.) EDN: QUHEZB

8. Stavtsev A.N., Braginets Yu.N., Khashir B.O. Legal regulation of the production of organic milk and its processed products. Ekonomika, trud, upravlenie v selskom khozyaistve [Economics, labor, management in agriculture]. 2022;2(84):20-28. (In Russ.) EDN: YGKICC

9. Mashletova V.A., Vakhramova O.G. Features of the production and processing of organic dairy products. Proc. All-Russian (national) Sci. Prac. Conf. with international participation (Kaluga, 12 December 2023). Kaluga: Kaluga: Individual Entrepreneur Yakunin V.A., 2024:24-28. (In Russ.) EDN: NFAOCG

10. Information and Technical Reference Book on Best Available Technologies for Manufacture of Beverages, Milk and Dairy Products. 2024. No. 45. [online]. URL: https://burondt.ru/NDT/NDTDocsDetail.php?UrlId=2278&etkstructure_id=1872 (accessed 10.02.2026) (In Russ.)

11. Mishurov N. P., Konovalenko L. Yu., Nemenuschaya L. A. Promising best available technologies in the field of processing of agricultural raw materials. Tehnika i oborudovanie dlya sela = Machinery and Equipment for Rural Area. 2022;9(303): 22-27. (In Russ.) https://doi.org/10.33267/2072-9642-2022-9-22-27 EDN: BHVTQC

12. Fedorenko V. F. On the technical modernization of agriculture. Tehnika i oborudovanie dlya sela = Machinery and Equipment for Rural Area. 2021;5(287):2-6. (In Russ.) https://doi.org/10.33267/2072-9642-2021-5-2-6 EDN: THAKTX

13. Bryukhanov A.Y., Vasiliev E.V., Shalavina E.V., Okhtilev M.Y., Koromyslichenko V.N. An instrument for environmental state and agricultural production's sustainable development monitoring. Tehnika i tehnologii v zhivotnovodstve = Machinery and Technologies in Livestock. 2023;1(49):78-84. (In Russ.) https://doi.org/10.22314/27132064-2023-1-78 EDN: UKCKMG

14. Shalavina E.V., Vasilev E.V., Papushin E.A. Analysis of manure separation technology efficiency into fractions followed by liquid fraction rectification. Inzhenernye tehnologii i sistemy = Engineering Technologies and Systems. 2023;33(2):237-255. (In Russ.) EDN: KYGKWF

Об авторе:	About the author:
Неменущая Людмила Алексеевна Старший научный сотрудник отдела научно-информационного обеспечения инновационного развития АПК ФГБНУ «Росинформагротех». 141261, Московская область, г.о. Пушкинский, р.п. Правдинский, ул. Лесная д. 60	**Ljudmila A. Nemenushchaya** Senior Research Fellow, Department of Scientific and Information Support for Innovative Development of the Agro-Industrial Complex, Federal State Budgetary Institution «Rosinformagrotech». 141261, Moscow region, G.O. Pushkinsky,

nemenuschaya@rosinformagrotech.ru https://orcid.org/0000-0001-7251-1545 +7-9851669487	R.P. Pravdinsky, Lesnaya str., 60 nemenuschaya@rosinformagrotech.ru https://orcid.org/0000-0001-7251-1545 +79851669487
Заявленный вклад автора Автор выполнил всю работу, связанную с исследованием и написанием статьи.	**Author's contribution** The author carried out all the work involved in researching and writing the article
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: 18.02.2026	**Received:** 18.02.2026
Одобрена после рецензирования: 22.05.2026	**Approved after reviewing:** 22.05.2026
Принята к публикации:11.09.2026	**Accepted for publication:** 11.09.2026

Аналитическая статья
УДК 636:631.86:663.15 DOI 10.24412/2713-2641-2026-3128-129-148

БИОЭКОНОМИЧЕСКИЕ ИННОВАЦИИ В ЖИВОТНОВОДСТВЕ: ОПТИМИЗАЦИЯ КОРМОВОЙ БАЗЫ И ПЕРЕРАБОТКА ПОБОЧНЫХ ПРОДУКТОВ

Татьяна Алексеевна Щеголихина

Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса (ФГБНУ Росинформагротех), р. п. Правдинский, Московская область, Россия
shegolihina@rosinformagrotech.ru, https://orcid.org/0000-0002-2971-6075

Аннотация. Для решения глобальных вызовов и достижения устойчивого развития агропромышленного комплекса необходима трансформация экономических моделей путем внедрения биоэкономических принципов и создания замкнутого цикла производства, что особенно актуально для животноводства. Биоэкономические инновации в молочном скотоводстве представляют комплекс биотехнологических, генетических и экономически обоснованных решений, направленных на повышение продуктивности и способствующих устойчивому развитию отрасли. Концепция циркулярной биоэкономики предполагает системный подход к трансформации молочных ферм в безотходные биоперерабатывающие кластеры, где побочные продукты возвращаются в производственный цикл. Целью исследования является выявление современных биоэкономических инноваций и решений в животноводстве, в частности в молочном скотоводстве КРС. Модель замкнутого цикла производства охватывает широкий спектр направлений – от поиска новых источников кормового белка до совершенствования технологий переработки побочных продуктов животноводства. Представлены примеры продуктов, созданных на основе альтернативных источников кормового протеина (насекомые, микробный белок, водоросли) и предназначенных для добавления в рацион сельскохозяйственных животных, разработанные в отечественных научных и производственных организациях. Названы наиболее распространенные технологии переработки органических отходов животноводства. Приведены примеры и описание современных биотехнологий переработки навоза с целью применения в качестве биоудобрения, подстилки для скота, а также в качестве сырья для процессов ферментации биогаза. Отмечена важность перехода к устойчивым методам производства в животноводстве и необходимость дальнейшего изучения потенциала биоэкономических инноваций для полномасштабного внедрения на промышленном уровне.

***Ключевые слова*:** биоэкономика, рециклинг, альтернативный белок, побочные продукты животноводства, КРС.

Для цитирования: Щеголихина Т.А. Биоэкономические инновации в животноводстве: оптимизация кормовой базы и переработка побочных продуктов // АгроЭкоИнженерия. 2026. № 3(128). С. 129-148 https://doi.org/ 10.24412/2713-2641-2026-3128-129-148

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания № 082-00120-26-00 (№ темы 1.5-26).

Analytical article
Universal Decimal Code 636:631.86:663.15

BIOECONOMICAL INNOVATIONS IN ANIMAL HUSBANDRY: OPTIMIZATION OF THE FEED BASE AND PROCESSING OF BY-PRODUCTS

Tatyana A. Shchegolikhina

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
shegolihina@rosinformagrotech.ru, https://orcid.org/0000-0002-2971-6075

Abstract. Addressing global challenges and achieving sustainable development of the agro-industrial complex require transforming the economic models through introduction of bioeconomic principles and creating a closed production cycle, which is especially important for animal husbandry. Bioeconomic innovations in dairy farming represent a set of biotechnological, genetic and economically sound solutions aimed at increasing productivity and contributing to the sustainable industry development. The concept of circular bioeconomy assumes a systematic approach to transforming dairy farms into zero-waste bio-processing clusters, where by-products are reintegrated into production cycle. This article identifies modern bioeconomic innovations and solutions in animal husbandry, in particular in dairy cattle production. The closed-cycle production model covers a wide range of domains, from the search for new sources of feed protein to the improvement of technologies for processing animal by-products. Specifically the article presents examples of products based on alternative sources of feed protein (insects, microbial protein, and algae) developed in national research and industry organizations for inclusion in farm animal diets. Furthermore, the article reviews the most common technologies for processing organic livestock waste providing examples and descriptions of modern biotechnologies of manure processing for the use as a biofertilizer, bedding for livestock, as well as a raw material for biogas fermentation. Finally, the article highlights the importance of the transition to sustainable production methods in animal husbandry and the need for further study of the potential of bioeconomic innovations for full-scale implementation at the industrial level.

Keywords: bioeconomics, recycling, alternative protein, animal by-products, cattle

For citation: Shchegolikhina T.A. Bioeconomical innovations in animal husbandry: optimization of the feed base and processing of by-products. AgroEcoEngineering. 2026;3(128):129-148 (In Russ.) https://doi.org/10.24412/2713-2641-2026-3128-129-148

Acknowledgements: the research was carried out within the framework of State Assignment No. 082-00120-26-00 on the topic 1.5-26.

Введение. В современном мире, сталкивающемся с глобальными вызовами, такими как изменение климата, истощение природных ресурсов и рост населения, трансформация существующих экономических моделей становится насущной необходимостью. Особую роль в этом процессе играет агропромышленный комплекс, который является фундаментом продовольственной безопасности и одновременно одним из основных потребителей природных ресурсов и источников отходов. Мировое животноводство находится в процессе глубокой трансформации, движимой необходимостью соответствовать требованиям устойчивого развития. Этот процесс характеризуется смещением от традиционной линейной

модели «производство-потребление-отходы» к сложным циклическим системам, основанным на принципах биоэкономики и опирающимся на использование и преобразование возобновляемых биологических ресурсов. Биоэкономика, как новая хозяйственная система, объединяет[54,55]:

- систему непрерывных управленческих мероприятий на уровне государственного и муниципального управления по развитию биоэкономики, выполняемых для производства товаров на основе возобновляемых ресурсов и оказания соответствующих услуг, включая переработку промышленных, сельскохозяйственных и бытовых отходов с целью повышения эффективности использования ресурсов и появления новых товаров, отвечающих потребностям экономики в условиях изменения технологического уклада;
- экономику замкнутого цикла, т. е. возобновляемое производство при максимально эффективном использовании ресурсов, повторное использование или переработка отходов и минимизация негативного влияния на природу.

В 2024 году рынок российской биоэкономики и биотехнологии и все, что с ним связано, оценивался на уровне 300 млрд. руб. и составлял 0,04% от мирового рынка. По оценкам экспертов к 2030 году мировой рынок биотехнологий достигнет 1,7 трлн. дол.[56]. В 2025 году президиум Совета при Президенте России по стратегическому развитию и национальным проектам утвердил паспорт национального проекта «Технологическое обеспечение биоэкономики» и входящие в его состав федеральные проекты: «Организация производства и стимулирование сбыта продуктов биоэкономики», «Научно-технологическая поддержка развития биоэкономики» и «Аналитическое, методическое и кадровое обеспечение биоэкономики»[57]. Целью проекта «Организация производства и стимулирование сбыта продуктов биоэкономики» выступает трансформация сырьевого экспортера в производителя продукции с высокой добавленной стоимостью. Локомотивами данного направления станут, в том числе, крупные агрохолдинги, инвестирующие в глубокую переработку сырья (биокормовые добавки, ферменты) и развивающие проекты по биоэнергетике[58]. К 2030 году рост объёмов производства биоэкономики должен составить 96%, доли отечественной биотехнологической продукции до 55%, уровень технологической независимости должен достичь 40 %. Ожидается увеличение количества предприятий, вовлечённых в подготовку, профессиональную переподготовку и повышение квалификации кадров по направлению биоэкономики[57].

---

[54]Резолюция Генеральной Ассамблеи ООН от 25 сентября 2015 г. «Преобразование нашего мира: Повестка дня в области устойчивого развития на период до 2030 года». United Nations Conference on Trade and Development. [Электронный ресурс] URL: https://unctad.org/system/files/official-document/ares70d1_ru.pdf (дата обращения 05.03.2026 г.)

[55]Экономика замкнутого цикла. Обзор международных подходов. 2021 [Электронный ресурс] URL: https://www.economy.gov.ru/material/file/55fc716c49b06e62a652d101b1be8442/220414.pdf (дата обращения 05.03.2026 г)

[56]Абрамов А. Стратегия развития биоэкономики России: анализ и перспективы 2024 [Электронный ресурс] URL: https://roscongress.org/materials/strategiya-razvitiya-bioekonomiki-rossii-analiz-i-perspektivy-2024/ (дата обращения 05.03.2026 г).

[57]Национальный проект «Технологическое обеспечение биоэкономики» [Электронный ресурс] URL: https://xn--80aapampemcchfmo7a3c9ehj.xn--p1ai/new-projects/bioekonomika/ (дата обращения 02.03.2026 г.)

[58]Стратегический разворот к биоэкономике: какие заделы есть у России для реализации нового нацпроекта [Электронный ресурс] URL: https://fedpress.ru/article/3427092 (дата обращения 03.03.2026 г.)

Достижение национальной цели «Экологическое благополучие», определенной Указом Президента Российской Федерации от 07.05.2024 г. №309 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года», требует формирования экономики замкнутого цикла, сокращения отходов и вовлечения в хозяйственный оборот отходов производства и потребления в качестве вторичных ресурсов и сырья[59]. Анализ текущих научных исследований и практических разработок показывает, что потенциал биоэкономических инноваций для создания замкнутого цикла производства направлен на формирование безотходных производственных процессов, эффективную утилизацию и расширение спектра использования побочных продуктов животноводства.

Цель исследования – комплексный обзор биоэкономических инноваций в животноводстве, в частности в молочном скотоводстве КРС для создания замкнутого цикла производства, направленного на оптимизацию кормовой базы и переработку побочных продуктов животноводства.

Материалы и методы. Объектом исследований являлись информационные, научно-технические и аналитические материалы по развитию биотехнологий в животноводческом секторе агропромышленного комплекса, опубликованные в открытом доступе. При проведении исследования использовались следующие методы: информационно-аналитический мониторинг, контент-анализ научных публикаций по теме исследования, сравнение, анализ, синтез, обобщение.

Результаты. В сельском хозяйстве модель замкнутого цикла производства охватывает широкий спектр направлений, от поиска новых источников кормового белка до совершенствования технологий переработки побочных продуктов животноводства с целью получения органических удобрений, внесение которых способствует восстановлению почвенного плодородия и повышению урожайности сельскохозяйственных культур, замыкая, таким образом, питательные циклы. Рационы питания животных должны соответствовать их физиологическому состоянию и уровню продуктивности, быть богаты белковой составляющей, как животного, так и растительного происхождения. Сырьем для производства белка служат отходы сельского хозяйства (солома, листья и стебли кукурузы, пожнивные остатки), пищевой и перерабатывающей промышленности (свекловичный и спиртовой жом, пивная дробина, спиртовая барда, различные жмыхи, отходы крахмало-паточного производства, мясопереработки, молочной, масложировой, мукомольной промышленности и др.) [1]. По данным аналитической компании BusinesStat (ООО «БизнесСтат»), крупнейшими производителями кормового белка в России являются АО «Агентство «Сельхозкорма» (г. Вологда), ОАО «Барнаульский пивоваренный завод» (Алтайский край), АО «Кондопожский целлюлозно-бумажный комбинат» (Республика Карелия), ЗАО «Московская пивоваренная компания», ООО «НПФ ВИК» (Московская область), ООО «Пивоваренная компания «Балтика» (г. Санкт-Петербург), АО «Татспиртпром» (Республика Татарстан), ООО «Частная пивоварня «Афанасий» (г. Тверь) и др.[60]. Производство кормового белка в России в 2024 году составило 98,3 тыс. т, что на 15%

[59] Указ Президента Российской Федерации от 07.05.2024 г. № 309 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года» [Электронный ресурс]. URL: http://www.kremlin.ru/acts/bank/50542?ysclid=mlt2pzsmtm716555995 (дата обращения 17.02.2026 г.)

[60]Анализ рынка кормового белка в России в 2020-2024 годах, прогноз на 2025-2029 годы [Электронный ресурс]. URL: https://businesstat.ru/catalog/id8847/?ysclid=mnfrmx5nia444017722 (дата обращения 13.03.2026 г.).

ниже по сравнению с 2022 годом (116 тыс. т) и на 40% с 2018 годом (165 тыс. т). Дефицит кормового белка в мире составляет более 30 млн т, в России – порядка 2-2,5 млн т[61,62]. В связи с этим большое значение приобретает поиск альтернативных способов производства кормовых ресурсов. Особого внимания заслуживает развитие технологий, связанных с использованием биомассы насекомых. Для кормовых целей используются 7 видов насекомых, включая 3 вида сверчков (*Acheta domesticus, Gryllodes sigillatus, Gryllus assimilis*), 2 вида мучных червей (*Tenebrio molitor, Alphitobius diaperinus*) и 2 вида мух (*Hermetia illucens, Musca domestica*)[63]. Отечественными и зарубежными учеными хорошо изучены насекомые Чёрная львинка (*H. illucens*), желтый мучной червь (*T. molitor*) и обыкновенная домашняя муха (*M. domestica*), личинки которых содержат биоактивные компоненты, такие как лауриновая кислота, антимикробные пептиды и хитин, обладающие иммуностимулирующими свойствами [2]. Добавление в питание молочных коров белка из личинок черной львинки (*H. illucens*) выделяется как одно из наиболее перспективных решений, способных создать замкнутую модель. Культивация насекомых происходит в изолированных от внешней среды условиях с соблюдением принципов биозащиты, чтобы избежать попадания внутрь предприятия инфекций, опасных для насекомых и человека. Субстратом для выращивания личинки черной львинки становятся измельченные органические отходы (плодово-овощные, зерновые и пищевые отходы, а также навоз сельскохозяйственных животных). По окончании развития личинки отделяют от субстрата, получая два промежуточных продукта производства – живую личинку и органическое удобрение. Живая личинка частично реализуется в замороженном виде, часть наиболее крупных и жизнеспособных особей отделяется и поступает на окукливание в качестве ремонтного молодняка в инсектарий, а большая часть личинки поступает на сушку и обезжиривание для получения высокобелковой и высокожировой муки, которая затем используется для производства полноценного кормового компонента. Эта технология не только создает качественный источник кормового белка, но и решает проблему утилизации отходов непосредственно на территории хозяйства. Исследование [3] показало, что отходы животноводства на основе навоза крупного рогатого скота, подвергнутые направленной микробиологической ферментации и используемые в качестве корма для личинок черной львинки, превращаются преимущественно в белок (54,1 г), что сопоставимо с содержанием в личинках белка (54,6 г) при кормлении их комбикормом, который является практически идеальным субстратом для выращивания маточной популяции личинок. Но в отличие от органических отходов, которые необходимо утилизировать, комбикорм имеет определенную цену. Себестоимость продукции напрямую зависит от стоимости сырья. Данная технология требует строгого контроля температуры и влажности для обеспечения нормального роста и развития черной львинки. Капитальные затраты для небольших систем разведения на старте могут быть относительно невысокими. Однако для достижения промышленных масштабов требуется значительное инвестирование в специализированные помещения, оборудование,

[61] Сельское хозяйство в России. 2025: Стат. сб./Росстат. М. 2025. 81 с.

[62] Агроэксперт скептически оценил успех инвестпроекта по производству биопротеина в Воронежской области [Электронный ресурс]. URL: https://abireg.ru/newsitem/101077/ (дата обращения 13.03.2026 г.)

[63] Кормовая альтернатива. Кормовой белок из насекомых: перспективы этого направления // Агротехника и технологии. 2020. №2. [Электронный ресурс]. URL: https://www.agroinvestor.ru/animal/article/33400-kormovaya-alternativa-kormovoy-belok-iz-nasekomykh-perspektivy-etogo-napravleniya/ (дата обращения 27.03.2026 г.)

сложные системы климат-контроля. На стадии культивирования необходимы инсектарные инкубаторы, термостаты, климатические камеры, стеллажные системы для вертикального выращивания. Для переработки насекомых требуется комбикормовое оборудование: мельницы, экструдеры, грануляторы и др. Затраты на систему отопления, вентиляции и кондиционирования для разведения взрослых особей могут ограничивать применение технологии в регионах суровыми климатическими условиями. Для регионов, где климат более благоприятен, эта технология может стать конкурентоспособной. В России деятельность в направлении исследований и производства энтомопротеина ведет ряд компаний: ООО «Экобелок», ООО «Биогенезис», ООО «НордТехСад» совместно с ФНЦ ВИЖ им. Л. К. Эрнста и др.

Другим перспективным направлением является биотехнологическое производство микробного белка или биопротеина, где продуцентами белка являются бактерии, дрожжи, высшие и низшие грибы, одноклеточные водоросли. Этот процесс заключается в культивировании одноклеточных микроорганизмов на различных субстратах (крахмал, меласса и другие побочные продукты переработки зерна, масложировой, спиртовой промышленности). Полученная после сбора и сушки микроорганизмов биомасса представляет собой белок высокой чистоты, которую можно использовать в качестве полноценной кормовой добавки для молочных коров. Дрожжевой протеин обладает высокой биологической ценностью, поскольку сбалансирован по аминокислотному составу. В России данные технологии развивают компании «Биотрейд», «Песчанский завод сухих кормовых дрожжей», «Волжский гидролизно-дрожжевой завод», Мамадышский спиртзавод», «ПК Петровский», АО «Сясьский ЦБК», ООО «Сернурский опытно-производственный завод», «Биофуд» и др. Разработкой и производством микробиологических кормовых компонентов занимаются резиденты Сколково: ООО «Протеиновые кормовые биотехнологии исследования», ООО «НПК «Микотех» [4]. Производство биомассы с помощью микробного синтеза характеризуется высоким содержанием белков (дрожжи – до 60 %, бактерии – до 75 % по массе) и способностью синтезировать белки из отходов сельского хозяйства и промышленности, позволяя одновременно решать проблему утилизации этих отходов в целях охраны окружающей среды [5]. Это открывает возможность для создания внутрихозяйственных производств, где побочные продукты одного процесса служат питательной средой для другого, что является квинтэссенцией принципов биоэкономики. Привлекательными в качестве белка для кормовых целей становятся микроводоросли, в частности хлорелла и спирулина, характеризующиеся высоким содержанием протеина 40-60% и обеспечивающие прирост биомассы в 200 раз больший, чем высшие растения. Белок водорослей в нашей стране производят компании «АкваСар», «Амфор», «Лес» и др. Еще одним альтернативным источником протеинов являются технологии получения кормового белка на основе газа (гаприн) и на основе парафинов нефти (паприн). Производство биомассы метанотрофных бактерий относится к разряду природоподобных технологий. Развитием этих технологий занимаются компании «Гипробиосинтез», «Метаника» и «ИмпактБио» и др. [4]. Среди мировых производителей производства кормовых протеинов на основе газа эксперты называют американские компании «Calysta», «Cargill», «DuPont» и норвежскую «Bioprotein», на основе насекомых – компании «Protix» (Нидерланды), «Agriprotein» (ЮАР) и Ÿnsect (Франция) и др.[64]. В таблице 1 представлены примеры

[64] Старостина Л. Белок будущего. Тренды рынка традиционных и альтернативных кормовых протеинов [Электронный ресурс]. URL: https://www.agroinvestor.ru/markets/article/43665-belok-

продуктов, созданных на основе альтернативных источников кормового протеина и предназначенных для добавления в рацион сельскохозяйственных животных, разработанные в научных и производственных организациях.

Таблица 1. Примеры продуктов, созданных на основе альтернативных источников кормового протеина

Table 1. Examples of products based on alternative sources of feed protein

Название	Описание	Производители
Белково-витаминная кормовая добавка «ГерметияВит» [65]	Предназначена для дойных коров, изготовлена на основе личинок *H. illucens* и пшеницы, может заменить до 80% используемого белка в рационе. Способствует увеличению удоев (6-8%), улучшению состояния иммунной системы, усвояемости питательных веществ и снижение кормового коэффициента до 10%.	ООО «Карелбиотех» (г. Петрозаводск)
Кормовая добавка на основе личинок мухи *H. illucens* [66,67]	Позволяет повысить сохранность животных и их стрессоустойчивость, увеличить интенсивность роста молодняка животных, снизить затраты кормов на единицу продукции, повысить экономическую эффективность производства	ФНЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста (Московская область), ООО «НордТехСад» (г. Новодвинск)
Белковый концентрат «Гермеция» [68]	Предназначен для применения в кормлении продуктивных животных на птицеводческих, свиноводческих, животноводческих и рыбоводческих хозяйствах в качестве источника белка, жира и биологически активных веществ для обогащения и балансирования рационов.	ООО «ЭкоБелок» (Московская область)
Белково-витаминная	Включает компоненты пшеницы и кукурузы, измельченную виноградную выжимку, содержит	ООО «ВиноТЕП»

budushchego-trendy-rynka-traditsionnykh-i-alternativnykh-kormovykh-proteinov/ (дата обращения 13.04.2026 г.)

[65] ГерметияВит: Эффективная кормовая добавка для животных, птиц и рыб [Электронный ресурс] URL: https://karelbiotech.ru/products (дата обращения 31.03.2026 г.)

[66] Аникин А.С., Антонов А.М., Дуборезов В.М., Зеленченкова А.А., Иванов Г.А., Некрасов Р.В., Чабаев М.Г. Способ кормления молодняка сельскохозяйственных животных. Патент № 2690487 РФ, заявл. 02.07.2018; опубл. 03.06.2019. Бюл. № 16. URL: https://www.fips.ru/publication-web/publications/document?type=doc&tab=IZPM&id=95F51FD1-0EFC-499C-AF69-2FBC7D6ECC34 (дата обращения 31.03.2026 г.)

[67] Малое инновационное предприятие «Нордтехсад» [Электронный ресурс]. URL: https://biolaboratoriya.ru/about (дата обращения 31.03.2026 г.)

[68] Корм для сельскохозяйственных животных (для крупного и мелкого рогатого скота, птиц) [Электронный ресурс]. URL: https://hermetia.ru/produktsiya-iz-lichinki-hermetia/#tab (дата обращения 31.03.2026 г.)

минеральная кормовая добавка «Провин» для молодняка коров[69]	белковый концентрат из личинок *H. illucens*, подсолнечный шрот, компонент ячменя. Повышает биологическую ценность рациона животных. Может быть использована при изготовлении корма для крупного рогатого скота. Рекомендовано добавление к основному рациону из расчета 65 г/гол. в сутки	(г. Краснодар)
Белковая кормосмесь, дрожжи кормовые[70]	В качестве продуцентов белка выступают штаммы дрожжей *Candida utilis K86, Saccharomyces cervisiae*. Содержат до 55% белка, витамины группы В, D_2 и различные минеральные соединения. Использование рекомендуемой дозы (для КРС – 0,5 кг/сут) в рационе дойных коров увеличивает надои и жирность молока на 2-5 л и до 0,5% соответственно.	ПК Петровский (Владимирская область)
Белково-витаминная добавка[71]	Получают путем выращивания биомассы дрожжеподобных грибов на цельной зерновой барде, которая остается после производства спирта. Содержит 28-35% белка и 38-44% сырого протеина высокой переваримости. Аминокислотный состав представлен в основном лизином, метионином и цистеином. Содержит микроэлементы (железо, цинк, марганец), витамины группы В, эргостерин. Скармливание 500 г/гол. в сутки способствует повышению продуктивности коров на 3-4 л/сут. и увеличению жирности молока на 0,4-0,6%.	Филиал АО «Татспиртпром» «Мамадышский спиртзавод» (Республика Татарстан)
Alfa Pure (Альфа)[72]	Производится за счет глубокой переработки кукурузы путем ферментации кукурузного крахмала с получением аминокислот и белка микробного происхождения. Содержит более 75%	АО «Агентство «Сельхозкорма» (г. Вологда)

[69] Фурсов Г.П., Шевченко В.Н., Кутепов И.Д., Степовой А.В., Забашта Н.Н., Данильченко О.Б., Мирошниченко П.В., Лисовицкая Е.П., Сабратова Н.Ю. Белково-витаминная минеральная кормовая добавка «Провин» для молодняка коров и способ ее применения. Патент № 2809706 РФ, заявл. 27.02.2023; опубл. 14.12.2023. Бюл. № 35. URL: https://www.fips.ru/publication-web/publications/document?type=doc&tab=IZPM&id=FCCB7BE0-E2F1-4456-96B9-DD7AD0D4FBDE (дата обращения 31.03.2026 г.)

[70] Производство белковых кормосмесей и дрожжей кормовых [Электронный ресурс]. URL: http://pkkorm.ru/ (дата обращения 13.04.2026 г.)

[71] На Мамадышском спиртзаводе (филиал «Татспиртпрома») разработали технологию производства белково-витаминной добавки из отходов спиртового производства [Электронный ресурс]. URL: https://www.agroinvestor.ru/technologies/article/14852-mamadyshskiy-spirtzavod-vyrashchivaet-drozhzhi-na-barde/ (дата обращения 10.04.2026 г.)

[72] Одноклеточный бактериальный белок Alfa Pure (Альфа) [Электронный ресурс]. URL: https://www.askfeed.ru/products/8 (дата обращения 13.04.2026 г.).

	сырого протеина и 55% аминокислот. Обеспечивает сохранность эмбрионов, здоровье кишечника и его микробиома, увеличение прироста живой массы. Способствует созданию более экономной структуры рациона, например: 300 г Alfa Pure (Альфа) заменяет 700 г качественного соевого шрота или 1,7 кг рапсового.	
Кормовая добавка «Живая хлорелла КРС-1»[73]	Оказывает положительное влияние на продуктивность, сохранность, здоровье животных и снижает выработку метана. Увеличивает надои молока на 10-20%, прирост веса на 10-20%.	ООО «Амфор» (Московская область)
Кормовая добавка «Инноприн»[74]	Инактивированная и высушенная биомасса метаноксиляющих бактерий *Methylococcus capsulatus* культивированных на природном газе (метане). Содержит до 78% белка, предназначена для обогащения протеином и балансирования кормов отраслей аквакультуры, птицеводства и животноводства.	ООО «Биопрактика» (г. Москва)
Кормовая добавка Дримфиид / DreamFeed®[75,76]	Предназначена для балансирования и обогащения рационов поросят, цыплят-бройлеров, КРС и рыб протеином. Представляет собой концентрат микробного белка из инактивированной культуры клеток *Methylococcus capsulatus* (штамм ГБС-15) с содержанием: сырого протеина – 70-80%, липидов – 9-14 %, золы – 6-10% и влаги – не более 10%.	ООО «Гипробиосинтез» (г. Москва), ПАО «Татнефть» (Республика Татарстан)

Широкое использование кормовых добавок на основе дрожжей свидетельствует о технологической зрелости производства микробной биомассы на основе побочных продуктов сахарного производства, спиртовой промышленности и др. Приоритетной задачей сегодня является поиск альтернативного сырья, не связанного с пищевой промышленностью. В связи с этим особое внимание уделяется проектам по синтезу биопротеина из непищевых источников, в частности из природного газа. Технико-экономический анализ производства микробного белка из природного газа, показывает высокую капиталоемкость, но и высокий экономический потенциал. Капитальные затраты на создание такого предприятия являются

[73] ООО «Амфор» разработало промышленную технологию экономически эффективного выращивания микроводоросли хлорелла [Электронный ресурс]. URL: https://fagln.tb.ru/ (дата обращения 13.04.2026 г.).

[74] Компания «Биопрактика» расширила возможности рынка кормовых добавок [Электронный ресурс]. URL: https://innopraktika.ru/news/2752/?ysclid=mny9yg0cyv42134243 (дата обращения 14.04.2026 г.).

[75] Дримфиид / DreamFeed® [Электронный ресурс]. URL: https://gibios.ru/dreamfeed (дата обращения 14.04.2026 г.).

[76] Высокопротеиновая кормовая добавка из природного газа ДРИМФИД™ [Электронный ресурс]. URL: https://tnbioprotein.ru/ (дата обращения 14.04.2026 г.).

значительными. Например, для одного из инвестиционных проектов, упоминаемых в открытых источниках, они оценивались в 6,3 млрд. рублей без учета НДС[77]. Целью проекта являлось освоение производства кормового белка из природного газа на основе метаноокисляющих бактерий и строительство биозавода мощностью 30 тыс. т в год с возможностью тиражирования в других регионах страны. Однако проект не был реализован в промышленном масштабе. Еще один проект по созданию научно-технологического производственного комплекса биотехнологии белка из метана НТПК «МЕТАНИКА» с капитальными затратами в 640 млн руб. и годовой выручкой 416 млн руб. демонстрирует высокую степень капиталоемкости. При этом показана высокая рентабельность: при фонде оплаты труда в 10 млн руб. и себестоимости 147,99 млн руб., годовая прибыль по до вычета процентов, налогов и амортизации (EBITDA) достигает 258,08 млн руб., а срок окупаемости составляет 2,5 года[78]. Концепция проекта предполагает строительство завода по производству технологических заводских установок переработки метана природного газа и модульных мобильных комплексов его переработки[79].

По оценкам экспертов, производство гаприна становится рентабельным при мощности завода в 20 тыс. т готового продукта в год[80]. Ориентировочно необходимая площадь для завода такой мощности – 10 га, с учетом увеличения производительности до 100 тыс. т – 40 га[81]. По данным информационно-аналитического агентства «ИМИТ» для создания предприятия на 100 тыс. т гаприна требуется порядка 10 млрд руб. и от трех до пяти лет[80]. Под влиянием макроэкономических обстоятельств затраты на создание производства белка из газа в 2024 году увеличились в 1,6 раза по сравнению с 2021 г., что является одной из причин, тормозящих развитие данной технологии. Также накладывает определенные трудности отсутствие типовых решений по иностранному оборудованию, например сепараторы, датчики контроля, измерительные приборы, сушилки[80]. Преимуществом технологии является предсказуемость и стабильность себестоимости по сравнению с традиционными источниками белка, стоимость которых подвержена колебаниям вследствие климатических рисков, влияния внешних факторов и мирового рынка. Цена сырья является одним из главных факторов, влияющих на экономическую целесообразность. При правильном планировании и размещении производства в регионах с

[77] Инвестиционный проект «Освоение производства кормового белка из природного газа на основе метаноокисляющих бактерий» [Электронный ресурс]. URL: https://hm.irk.ru/wp-content/uploads/2021/07/proekt_bzvd.pdf (дата обращения 27.07.2026 г.).

[78] Производство кормового белка Научно-технологический производственный комплекс биотехнологии белка из метана НТПК «МЕТАНИКА» [Электронный ресурс]. URL: https://files.sk.ru/navigator/company_files/1123996/1640281416_%D0%91%D0%92%D0%9A2020-3.pdf (дата обращения 27.07.2026 г.).

[79] Концепция проекта [Электронный ресурс]. URL: https://metaprin.ru/company (дата обращения 07.08.2026 г.).

[80] Протеин на метанотрофах. Каковы перспективы появления в России промышленного производства гаприна [Электронный ресурс]. URL: https://www.agroinvestor.ru/markets/article/43085-protein-na-metanotrofakh-kakovy-perspektivy-poyavleniya-v-rossii-promyshlennogo-proizvodstva-gaprina/ (дата обращения 07.08.2026 г.).

[81] Производство микробного кормового белка из природного газа (Кормовая добавка «Инноприн») [Электронный ресурс]. URL: https://atr.gov.ru/tech/637138209782?ysclid=msr6zz8jwx597500365#down (дата обращения 13.08.2026 г.).

обширной газовой инфраструктурой, данная технология станет одним из инструментов для решения проблемы дефицита кормового белка[82].

Микробиологическое производство белка по сравнению с традиционным сельскохозяйственным с большей эффективностью использует энергетические и материальные ресурсы, не требует земельных площадей и не зависит от климатических условий. По качеству и содержанию белка микробная биомасса близка к продуктам животного происхождения. Наращивание темпов микробиологического производства сдерживается сырьевой базой, в качестве которой служат отходы пищевой, целлюлозно-бумажной и гидролизной промышленности, углеводороды [83].

Одной из глобальных проблем АПК является утилизация органических отходов интенсивного животноводства и птицеводства (навоза, помета и стоков). Побочные продукты животноводства (ППЖ) содержат значительное количество ценных веществ и являются потенциальным сырьем для производства дополнительной продукции или утилизируются [6]. В рамках биоэкономической концепции они рассматриваются как ценные ресурсы, которые могут быть повторно использованы в производственной цепи. Такая модель, основанная на принципах замкнутого цикла, стремится минимизировать загрязнение окружающей среды, снизить зависимость от внешних ресурсов и повысить экономическую устойчивость ферм. Цель состоит не просто в удалении побочных продуктов животноводства, а в их возврате в сельскохозяйственные культуры в форме высококачественных доступных для растений биоудобрений и компостов. Анализ информационных источников показал, что среди технологий переработки отходов животноводства наибольшее распространение в условиях российских предприятий получили технологии длительного выдерживания и пассивного компостирования, реже – активного компостирования и биоферментация, а вермикомпостирование и анаэробная обработка не достигли стадии полномасштабного внедрения на промышленном уровне [7-9]. Применяемые сегодня технологии переработки органических отходов животноводства в органические удобрения малоэффективны и не отвечают в полной мере экологической безопасности (резкий запах, выброс парниковых газов в атмосферу; риск загрязнения окружающей среды с дождевыми и талыми водами; длительный период обезвреживания и обеззараживания; отсутствие или не полная ферментация органического сырья; замедление и остановка процесса ферментации в холодное время года). Получаемые органические удобрения имеют небольшую агрономическую ценность: низкий коэффициент использования элементов питания и длительное действие (до 5 лет); риск наличия семян сорняков, патогенов, яиц гельминтов; высокую влажность компоста (30-70%); высокие затраты на логистику и внесение в почву; образование парниковых газов при внесении. Также насущным остается вопрос достаточности площадей для внесения побочных продуктов животноводства рекомендуемыми нормами. Только соответствие размера площадей для внесения побочных продуктов животноводства поголовью животных на предприятии может обеспечить его экологическую безопасность. Кроме наличия достаточного количества площадей земель сельскохозяйственного назначения, пригодных

[82] Затраты на производство микробных белков могут быть более предсказуемыми и стабильными – эксперт компании «Биопрактика» [Электронный ресурс]. URL: https://innopraktika.ru/smi-o-nas/2754/ (дата обращения 27.07.2026 г.)

[83] Киселева О.В., Тарнопольская В.В., Миронов П.В. Биотехнология пищевого белка : учеб. пособие. Красноярск: СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2021. 92 с.

для утилизации ППЖ, необходимы технические средства, обеспечивающие их перемешивание, транспортировку и внесение на поля заданными нормами и в оптимальные сроки [10]. Современные биотехнологии направлены на обработку твердой фракции навоза с целью применения в качестве подстилки для скота, биоудобрения, а также в качестве сырья для процессов ферментации биогаза. Подобные технологии разрабатываются отечественными НИИ и производственными компаниями, в том числе в ИАЭП – филиале ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (г. Санкт-Петербург), ВНИИМЗ – филиале ФГБНУ ФИЦ «Почвенный институт им. В.В. Докучаева» (Тверская область), ООО «Биокомплекс», ООО «Обезвреживание отходов» (ГК «АБОНО»), ООО «АИК» (г. Москва), ООО «НПО «Биогаз», ООО «Агробиотех» (г. Санкт-Петербург), ООО «АльтЭнерго» (г. Белгород) и др. Выбор возможных методов переработки зависит от условий производства, наличия оборудования, транспортных средств и т.д. В таблице 2 приведены примеры и описание перспективных технологий переработки навоза [10-14].

Таблица 2. Примеры технологий переработки побочных продуктов животноводства
Table 2. Examples of technologies for processing animal by-products

Название	Описание
Ускоренное компостирование навоза и помета[84]	В процессе микробиологического компостирования участвуют более 2000 видов бактерий и не менее 50 видов грибов. Основная идея состоит в перемешивании материала без измельчения, контролируя температуру, влажность и уровень CO_2 в компосте. Длительность процесса составляет 7-14 дней. Конечным продуктом является обеззараженный компост. Биологические процессы с образованием гуминовых кислот, активизированные на начальной стадии, продолжаются еще несколько месяцев после внесения удобрений в почву, что способствует восстановлению и развитию множества необходимых для грунта форм жизни уже непосредственно в почве.
Ускоренное компостирование ABONO®[85]	Реализуется с помощью ворошителей буртов, тунельных ворошителей, биореакторов, биоферментеров, биобарабанов, систем орошения/увлажнения, систем аэрации, оборудования для слежения за процессами компостирования.
Технология ускоренной переработки навоза и помета в высокоэффективные	Технология основана на управляемой аэробной твердофазной ферментации навоза, птичьего помета и другого органического сырья в специальных камерах-биоферментаторах. Продолжительность ферментации органического сырья с

[84] Ускоренное компостирование навоза и помета [Электронный ресурс]. URL: https://biokompleks.ru/solutions/kompostirovanie-navoza-i-pometa/ (дата обращения 14.04.2026 г.).
[85] Ускоренное компостирование навоза и помета [Электронный ресурс]. URL: https://abono.ru/info/uskorennoe-kompostirovanie/?ysclid=mo8d9d31qw869662778 (дата обращения 21.04.2026 г.).

экологически чистые удобрения (КМН)[86]	получением компоста многоцелевого назначения (КМН) составляет 6-7 суток.
Технология ускоренного компостирования органического сырья в закрытом помещении с искусственным микроклиматом, принудительной аэрацией и грануляцией (ТУКОС)[87]	В основе производственного процесса лежит технология аэробной ферментации органического сырья с помощью содержащихся в нем полезных бактерий. Обеспечивает получение готового к применению гранулированного органического удобрения (ГОУ), содержащего макро-, мезо- и микроэлементы в легкодоступной форме с коэффициентом использования растениями не менее 90 %, а также полезную микрофлору (биологические антибиотики, стимуляторы роста, азотофиксаторы и пр.), гуминовые и фульвовые кислоты, аминокислоты, витамины. Технология является природоподобной, ускоряет процесс компостирования до 5-6 недель, не допускает появления образований гнили и тяжелого запаха. Выход готовой продукции составляет примерно 0,3:1, т.е. из 1 тонны органического сырья влажностью 60-65 % получается примерно 0,3 тонны готовых удобрений влажностью до 15 %.
Вермикомпостирование	Биотехнологический метод утилизации органических отходов путем переработки их червями, простейшими и микроорганизмами. Вермикультура является безотходной технологией, позволяющей получать экологически чистое удобрение – биокомпост (биогумус) с высоким содержанием углерода, основных элементов питания растений, ферментами, гормонами роста, активной микрофлорой, с пролонгированным действием при внесении в почву. Наиболее ценен биогумус, полученный из навоза КРС с помощью гибрида красного калифорнийского червя.
Производство подстилки для животных на основе навоза КРС[88,89]	Процесс переработки твердой фракции навоза в подстилку происходит в биореакторе вертикального или горизонтального типа, состоящим из комплекса устройств и механизмов (шнековый сепаратор, смеситель, выгрузной шнек, дистанционный щит управления, лестницу с утепленным бункером, отвод пара,

[86] Технология ускоренной переработки навоза и помета в высокоэффективные экологически чистые удобрения (КМН) [Электронный ресурс] URL: http://vniimz.ru/production/technology-and-development/ (дата обращения 21.04.2026 г.).

[87] Комплекс по переработке органического сырья / Краткое описание проекта. 2022 г. 26 с. [Электронный ресурс] https://smarteka.com/uploads/files/2022/08/09/f929c057-4e84-4dad-b3f9-569c8b54173aede95d0f-d318-416e-be66-54cdba9b6d7d.pdf (дата обращения 21.04.2026 г.)

[88] Подстилка, восстановленная из навоза КРС [Электронный ресурс]. URL: https://biokompleks.ru/solutions/podstilka-vosstanovlennaya-iz-navoza-krs/ (дата обращения 17.04.2026 г.).

[89] Шведов А.А., Гриднев П.И., Гриднева Т.Т., Спотару Ю.Ю. Устройство по переработке твердой фракции навоза в подстилку для КРС при регулируемом биотермическом процессе. Патент № 2683638 РФ, заявл. 28.11.2017; опубл. 29.03.2019. Бюл. № 10. URL: https://www.fips.ru/publication-web/publications/document?type=doc&tab=IZPM&id=4C90C318-FA16-4EB6-B5F3-FEA14A241F26 (дата обращения 17.04.2026 г.).

	электродвигатель шнека, воздуходувка и весовой датчик). Нагнетаемый воздух поддерживает аэробный процесс биологического разложения органических веществ, присутствующих в коровьем навозе. Процесс является экзотермическим, образующееся тепло (до 65-70° С) используется для обеззараживания и биосушки навоза. Производство подстилки в реакторе полностью автоматизировано, система контроля не позволяет производить подстилку влажностью более 55%, не прошедшую гарантированное обеззараживание и обезвреживание. Навоз в вертикальном биореакторе уходит слоями, материал не перемешивается, выгружается только с нижнего слоя.
Анаэробное сбраживание навоза	Технология, при которой микроорганизмы разлагают органические вещества в отсутствие кислорода в специальных биогазовых установках, производя биогаз и биоудобрение. Обеспечивает дегельминтизацию, девитализацию, подавление патогенных форм микроорганизмов, повышение удобрительной ценности обрабатываемого продукта. Отмечается значительное снижение выбросов парниковых газов в атмосферу как за счет снижения выбросов метана в атмосферу при традиционных технологиях хранения навоза, так и за счет замещения ископаемых видов топлива при использовании биогаза для производства энергии.
Технология пиролизной утилизации твердого бесподстилочного навоза	Применяется следующее оборудование: модернизированная пиролизная установка ГВА-1, система очистки и сушки пирогаза, измельчитель, сито, газогенератор. Выход пиролизного газа из 1 кг твердого навоза КРС влажностью 3–4% и размером фракции 1-30 мм составляет 0,105 $м^3$, что соответствует 0,058 кВт энергии. Внедрение данной технологии уменьшит агрессивное воздействие твердого навоза на экологию мерзлотных почв, снизит процесс оттайки мерзлоты, а сопутствующими продуктами будут альтернативное топливо в виде пирогаза и доступное удобрение в виде золы.
Переработка навоза в топливный газ с помощью СВЧ-пиролиза	Метод микроволнового пиролиза позволяет термически разлагать органические соединения без доступа воздуха и одновременно воздействовать СВЧ-излучением на весь объем материала. Электромагнитные волны проникают в толщу обрабатываемого сырья, обеспечивая его равномерный нагрев при сниженном энергопотреблении. Полученный пиролизный газ обладает относительно высокой теплотворной способностью при низком содержании балластных газов, что обеспечивает экологически безопасную переработку навоза с меньшим парниковым эффектом.
Технология получения биоэтанола	Для переработки навоза и помёта требуются такие компоненты как серная кислота, тёртый мел, вода, сахар и дрожжи. Растительный

	биоэтанол производится из крахмалосодержащих и сахаросодержащих сельскохозяйственных культур. При производстве биоэтанола из навоза/помёта необходимая концентрация крахмала и/или сахара сохраняется, так как эти продукты входят в рацион скота. Полученный биоэтанол может использоваться как присадка к топливу (Е10, Е85 и др.) или технический спирт. Основными отходами производства являются углекислый газ и барда (сухой остаток), которые можно утилизировать комплексом по переработке CO_2 и продажей барды как удобрения. Технология позволит снизить выбросы от ППЖ и транспортных средств в окружающую среду. Использование ППЖ в качестве основного сырья делает стоимость биоэтанола ниже, чем при использовании растительного сырья.
Технология получения биопластика и биопродуктов[90]	Получение ацетата целлюлозы из навоза при атмосферном давлении и последующее получение волокна из регенерированной целлюлозы, путем разделения навоза на полезные компоненты. Включает стадии: флокуляционной очистки и фильтрации навоза, на которой навоз разделяют с помощью сит на твердые фракции, содержащие лигноцеллюлозу; варки полученных твердых фракций, при атмосферном давлении с получением растворимой целлюлозной массы; ацетилирование полученной массы уксусным ангидридом и катализатором с получением ацетата целлюлозы.

Анализ рассмотренных технологий позволяет выявить их технико-экономическую состоятельность и потенциал для внедрения в российских условиях. Большинство существующих подходов сосредоточены на получении удобрений (компостирование) и производства биогаза (анаэробное сбраживание). Экономическая целесообразность внедрения биогазовых установок обусловлена рядом ключевых факторов: оптимизацией затрат на энергоресурсы, сокращением издержек на переработку отходов, а также формированием дополнительных источников дохода за счет реализации электроэнергии и органических удобрений. Стоимость биогазовой установки зависит от объёма реактора и производительности, комплектации и степени автоматизации, типа сырья, сложности системы и региона. Значительную часть эксплуатационных затрат биогазовых установок составляют расходы на электроэнергию, необходимую для работы оборудования и поддержания температуры в реакторе. Если в теплых регионах эти затраты незначительны, то в условиях умеренного и холодного климата расходы на обогрев становятся определяющим фактором экономической эффективности проекта. По мнению экспертов, внедрение биогазовых установок становится экономически целесообразным решением для агробизнеса, ориентированного на автономность. Оптимальным вариантом использования биогазовой технологии является строительство подобных установок вблизи животноводческих ферм с использованием биогаза для собственных нужд. Для средней

[90] Эссаиди, Д. Способы получения биопластика и биопродуктов из навоза. Патент № 2750146 РФ, заявл. 17.05.2017; опубл. 22.06.2021. Бюл. № 18. URL: https://patents.google.com/patent/NL2016798B1/ru (дата обращения 17.04.2026 г.).

фермы в 250 голов КРС экономия на природном газе может составить 1,9 млн руб. Внедрение биогазовых установок позволяет сэкономить на тепло- и энергообеспечении и быть независимым от энергетической инфраструктуры, что важно для южных и восточносибирских регионов России [15, 16]. Так, исходя из проведенного в исследовании [17] расчета экономической эффективности биогазовой установки за год для предприятия в Белгородской области с общем поголовьем КРС 800 голов, можно сделать вывод, что установка обладает высокой эффективностью конверсии: собственное потребление биогаза составляет всего около 4,4% от общего объема выработки (200 тыс. м³ из 4,5 млн м³), что свидетельствует о высокой доле товарной продукции (более 95%). Срок окупаемости составил 7,5 лет, что для проектов в сфере возобновляемой энергетики и переработки отходов считается приемлемым.

Экономическая эффективность переработки навоза в биоудобрения значительно выше, чем у биогазовых станций, за счет низких капитальных затрат и отсутствия расходов на сырье. Рентабельность таких проектов часто высока, поскольку они решают проблему утилизации отходов и создают дополнительный источник дохода, что делает технологию оптимальным инструментом для внедрения принципов замкнутого цикла в фермерских хозяйствах.

Переработка побочных продуктов животноводства в концепции замкнутых циклов биоэкономики предусматривает использование их не только как ресурсы для внутренних нужд хозяйства, но и как сырьевые материалы для других отраслей экономики. Ключевыми элементами такой системы являются технологии, способные преобразовывать органические отходы в биоудобрения, биотопливо, биопластики и другие продукты с добавленной стоимостью. Это позволяет расширить масштабы и влияние принципов циркулярности, превращая отрасль в поставщика ценных ресурсов для агрономии, энергетической и химической промышленности, строительства и др. Такой подход не только минимизирует объемы отходов, отправляемых на полигоны или требующих дорогостоящей утилизации, но и создает новые источники дохода для молочных комплексов.

Выводы.

1. Биоэкономический подход в кормлении КРС объединяет биологические требования животных к питанию и экономические аспекты его организации, достижение максимальной продуктивности при минимальных затратах. Одним из исследуемых направлений организации полноценного сбалансированного кормления с учётом потребности животных является поиск альтернативных источников белка, которые могли бы частично или полностью заменить традиционные компоненты рационов.

2. Достижение национальной цели «Экологическое благополучие» требует формирования экономики замкнутого цикла и активного внедрения биоэкономических инноваций в практику сельского хозяйства. Необходимо создавать систему, инфраструктуру и технико-технологическое обеспечение для переработки органических отходов в полезные продукты и вовлечение их в хозяйственный оборот согласно принципам экономики замкнутого цикла.

3. Развитие биоэкономических инноваций находится на этапе разработки концепций. Большинство рассмотренных технологий находится на стадии лабораторных исследований или пилотных внедрений, что указывает на необходимость проведения дополнительных исследований для оценки их функционирования в промышленных условиях и определения

реальной экономической эффективности при различных климатических и социально-экономических параметрах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Неменущая Л.А., Коноваленко Л.Ю. Кормопроизводство на основе технологий рециклинга // Техника и технологии в животноводстве. 2023. № 2(50). С. 80-84. https://doi.org/10.22314/27132064-2023-2-80

2. Некрасов Р.В., Чабаев М.Г., Туаева Е.В., Никанова Д.А., Боголюбова Н.В., Шаповалов С.О., Иванов Г.А. Влияние липидной фракции личинок Чёрной львинки на продуктивность, резистентность и обменные процессы у телят молочного периода выращивания // Аграрная наука. 2023. № 11. С. 64-69. https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-376-11-64-69

3. Песцов Г.В., Третьякова А.В., Прокудина О.В., Бутенко С.А. Изучение влияния факторов окружающей среды на рост и развитие насекомого вида Hermetia illucens (Черная львинка) // Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture. 2023. № 15 (2). С. 24-40. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2023-15-2-24-40

4. Больше протеинов – хороших и разных // Комбикорма. 2023. №10. С. 18-24. EDN: FIOVZI

5. Лебедько Е.Я., Катмаков П.С., Бушов А.В., Гавриленко В.П. Биотехнология в животноводстве. СПб.: Лань. 2023. 160 с. EDN: ZAIITK

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

7. Шалавина Е.В., Васильев Э.В., Папушин Э.А. Анализ технологий переработки отходов животноводства в различных природно-климатических условиях России // АгроЭкоИнженерия. 2023. № 3(116). С. 110-123. https://doi.org/10.24412/2713-2641-2023-3116-110-123

8. Неменущая Л.А., Масловский С.А., Щеголихина Т.А., Манохина А.А., Осмоловский П.Д. Перспективные экологически безопасные технологии рециклинга животного сырья: аналит. обзор. М.: Росинформагротех. 2024. 84 с. https://elibrary.ru/item.asp?id=82638478

9. Романов А.С., Васильев Э.В. Анализ интенсивных технологий переработки побочных продуктов животноводства с внедрением альтернативных источников энергии // Техника и технологии в животноводстве. 2022. № 4(48). С. 90-97. https://doi.org/10.51794/27132064-2022-4-90

10. Биоконверсия побочных продуктов животноводства и отходов АПК: Коллективная монография. Владимир: Верхневолжский федеральный аграрный научный центр. 2023. 333 с. https://doi.org/10.51961/9785605088035

11. Суханова И.М., Шарафеева Ф.Г., Газизов Р.Р., Биккинина Л.М.Х., Ильясов М.М. Вермикомпостирование как решение экологической проблемы утилизации отходов животноводства // Ученые записки Казанской государственной академии ветеринарной медицины им. Н.Э. Баумана. 2015. Т. 223. № 3. С. 194-198. EDN: UIWZEZ

12. Спиридонова А.В., Друзьянова В.П., Осмонов О.М., Тарабукина О.К., Сивцева Ж.Г. Пиролизная технология - перспективный способ утилизации твёрдого высушенного

навоза // Дальневосточный аграрный вестник. 2022. № 16 (1). С. 143-150. https://doi.org/10.22450/1999-6837-2022-16-1-143-150

13. Tabakaev R., Kalinich I., Mostovshchikov A., Dimitryuk I., Asilbekov A., Ibraeva K., Gajdabrus M., Shanenkov I., Rudmin M., Yazykov N., Prejs S. Microwave pyrolysis of cattle manure: initiation mechanism and product characteristics. Biomass Conversion and Biorefinery. 2024. Vol.14. P. 26193-26204 https://doi.org/10.1007/s13399-023-04686-9

14. Борщёв В.Г., Григорьев М.Н., Царькова М.А. Инновационная технология переработки отходов животноводства в биоэтанол // Технико-технологические проблемы сервиса. 2022. №3 (61). С. 118-125. EDN: TYVAMH

15. Долгополик М.В. Веревка Т.В. Потенциал развития биогазовой энергетики в Российской Федерации // Интеллектуальная инженерная экономика и Индустрия 5.0 (ИНПРОМ-2024): Сб. трудов X Межд. науч.-практ. конф. В 2-х томах. (Санкт-Петербург, 25-28 апреля 2024 г.) Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС. 2024. Т. 1. С. 333-336. EDN: XPKZSY3

16. Щеголихина Т.А. Технологические решения для переработки навоза в биогаз как компонент экономики замкнутого цикла // Техника и оборудование для села. 2026. № 7(349). С. 48-52. https://doi.org/10.33267/2072-9642-2026-7-48-52

17. Добрунова А.И., Акупиян О.С., Ломазов В.А., Акупиян А.Н., Капинос Р.В. Технико-экономический анализ использования биогазовой энергетики в АПК Белгородской области // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2021. № 1(29). С. 150-166. EDN: LMDYMQ

REFERENCES

1. Nemenuschaya L.A., Konovalenko L.Yu. Feed production based on recycling technologies. Tekhnika i Tekhnologii v Zhivotnovodstve = Machinery and technologies in livestock. 2023; 2(50):80-84. (In Russ.) https://doi.org/10.22314/27132064-2023-2-80

2. Nekrasov R.V., Chabaev M.G., Tuaeva E.V., Nikanova D.A., Bogolyubova N.V., Shapovalov S.O., Ivanov G.A. Influence of lipid fraction of Black Soldier fly larvae on productivity, resistance and metabolic processes in milk-fed period calves. Agrarnaya nauka = Agrarian Science. 2023;(11):64-69. (In Russ.) https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-376-11-64-69

3. Pestsov G.V., Tretyakova A.V., O Prokudina.V., Butenko S.A. Study of the influence of environmental factors on the growth and development of the insect species *Hermetia illucens* (Black Soldier Fly). Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture, 2023, vol. 15, no. 2, pp. 24-40. (In Russ.) https://doi.org/10.12731/2658-6649-2023-15-2-24-40

4. More proteins of a good quality and diversity. Kombikorma = Concentrate Feed. 2023;10:18-24. (In Russ.) EDN: FIOVZI

5. Lebedko E.Ya., Katmakov P.S., Bushov A.V., Gavrilenko V.P. Biotechnology in Animal Husbandry. Saint Petersburg: Lan Publ. 2023. 160 p. (In Russ.) EDN: ZAIITK

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

7. Shalavina E.V., Vasilev E.V., Papushin E.A. Analysis of technologies for processing animal waste in different natural and climatic conditions of Russia. AgroEcoEngineering. 2023;3(116): 110-124. (In Russ.) https://doi.org/10.24412/2713-2641-2023-3116-110-123

8. Nemenushchaya L.A., Maslovsky S.A., Shchegolikhina T.A., Manokhina A.A., Osmolovskiy P.D. Promising environmentally friendly technologies for recycling animal raw materials: analytical review. Moskow: Rosinformagrotech. 2024. 84 p. (In Russ.) https://elibrary.ru/item.asp?id=82638478

9. Romanov A.S., Vasiliev E.V. Analysis of livestock's by-products processing intensive technologies at the alternative energy sources introducing. Tekhnika i Tekhnologii v Zhivotnovodstve = Machinery and Technologies in Livestock. 2022;4(48):90-97. (In Russ.) https://doi.org/10.51794/27132064-2022-4-90

10. Bioconversion of animal by-products and agricultural waste: A collective monograph. Vladimir: Upper Volga Federal Agrarian Scientific Center. 2023. 333 p. (In Russ.) https://doi.org/10.51961/9785605088035

11. Sukhanova I.M., Sharafeeva F.G., Gazizov R.R., Bikkinina L.M-H., Ilyasov M.M. The vermicomposting as a solution to the environmental problem of disposing of animal waste. Uchenye zapiski Kazanskoi gosudarstvennoi akademii veterinarnoi meditsiny im. N.E. Baumana = Scientific Notes of the Kazan Academy of Veterinary Medicine named after N.E. Bauman. 2015; 223 (3): 194-198. (In Russ.) EDN: UIWZEZ

12. Spiridonova A.V., Druz'yanova V.P., Osmonov O.M., Tarabukina O.K., Sivtseva Zh.G. Pyrolysis technology – a promising way of dried manure solids utilization. Dal'nevostochnyi agrarnyi vestnik = Far Eastern Agricultural Journal. 2022;16 (1):143-150. (In Russ.) https://doi.org/10.22450/1999-6837-2022-16-1-143-150

13. Tabakaev R., Kalinich I., Mostovshchikov A., Dimitryuk I., Asilbekov A., Ibraeva K., Gajdabrus M., Shanenkov I., Rudmin M., Yazykov N., Prejs S. Microwave pyrolysis of cattle manure: initiation mechanism and product characteristics. Biomass Conversion and Biorefinery. 2024;14: 26193-26204. https://doi.org/10.1007/s13399-023-04686-9

14. Borschev V.G., Grigoriev M.N., Tsarkova M.A. Innovative technology for processing animal waste into bioethanol. Technico-tehnologicheskie problemy servisa = Technical and Technological Problems of the Service. 2022;3 (61):118-125. (In Russ.) EDN: TYVAMH

15. Dolgopolik M.V. Verevka T.V. Potential of biogas energy development in the Russian Federation. In: Intelligent Engineering Economics and Industry 5.0 (IEEI 5.0 INPROM). Proc. X Int. Sci. Prac. Conf. In two volumes (Saint Petersburg, April 25-28, 2024). Saint Petersburg: Polytechnic Press. 2024; 1: 333-336. (In Russ.) EDN: XPKZSY

16. Shchegolikhina T.A. Technological solutions for manure processing into biogas as a component of the circular economy. Tekhnika i oborudovanie dlya sela = Machinery and Equipment for Rural Area. 2026;7(349): 48-52. (In Russ.) https://doi.org/10.33267/2072-9642-2026-7-48-52

17. Dobrunova A.I., Akupiyan O.S., Lomazov V.A., Akupiyan A.N., Kapinos R.V. Technical and economic analysis of the use of biogas energy in the agro-industrial complex of the Belgorod region. Innovatsii v APK: problemy i perspektivy = Innovations in Agricultural Complex: Problems and Perspectives. 2021;1(29):150-166. (In Russ.) EDN: LMDYMQ

Об авторе	About the author
Щеголихина Татьяна Алексеевна, старший научный сотрудник, ФГБНУ «Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по	**Tatyana A. Shchegolikhina,** senior research worker, Russian Research Institute of Information and Technical and Economic Studies on

инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса», 141261, Московская область, г. о. Пушкинский, р. п. Правдинский, ул. Лесная д. 60 E-mail: shegolihina@rosinformagrotech.ru, https://orcid.org/0000-0002-2971-6075	Engineering and Technical Provision of Agro-Industrial Complex, 141261, Moscow Region, Urban District Pushkinsky, Industrial Township Pravdinsky, Lesnaya Str., 60 E-mail: shegolihina@rosinformagrotech.ru, https://orcid.org/0000-0002-2971-6075
Заявленный вклад автора Автор выполнил весь проект	**Author's contribution** Single 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 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: 07.05.2026	**Received:** 07.05.2026
Одобрена после рецензирования: 31.08.2026	**Approved after reviewing:** 31.08.2026
Принята к публикации: 11.09.2026	**Accepted for publication**: 11.09.2026