



Сельскохозяйственные МАШИНЫ И ТЕХНОЛОГИИ

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
Основан в 2007 году

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«ФЕДЕРАЛЬНЫЙ НАУЧНЫЙ АГРОИНЖЕНЕРНЫЙ ЦЕНТР ВИМ»

Журнал зарегистрирован
Федеральной службой по надзору
в сфере связи, информационных
технологий и массовых коммуникаций
(РОСКОМНАДЗОР)
Свидетельство ПИ № ФС77-84201
от 22 ноября 2022 г.

Журнал включен в перечень изданий,
рекомендованных ВАК РФ для публика-
ции трудов соискателей ученых степе-
ней кандидата и доктора наук по специ-
альностям: 4.1.5 / 4.3.1 / 4.3.2 / 5.6.6.

Журнал включен
в Российский индекс
научного цитирования (РИНЦ)

Полные тексты статей
размещены на сайте электронной
научной библиотеки: <http://elibrary.ru>

Охраняется законом РФ № 5351-1
«Об авторском праве и смежных правах»
от 9 июля 1993 года. Контент распростра-
няется под лицензией Creative Commons
Attribution 4.0 License. Нарушение закона
будет преследоваться в судебном порядке.

НАД НОМЕРОМ РАБОТАЛИ:
В.В. Бижаев,
Г.В. Быковская,
Л.А. Горелова,
Р.М. Нурбагандова
Перевод – Светлана Сорокина

АДРЕС РЕДАКЦИИ:
109428, Москва,
1-й Институтский проезд, 5, стр. 1.
Телефоны: (499) 174-88-11
(499) 174-89-01

<http://www.vimsmit.com>
e-mail: smit@vim.ru

Мнение редакции не всегда совпадает
с позицией авторов публикаций.
Ответственность за достоверность
изложенных фактов и правильность
цитат несут авторы.
Не принятые к публикации статьи не воз-
вращаются и не рецензируются.

Выходит 4 раза в год
(Свободная цена)
Дата выхода в свет 15.12.2025
Формат 60х90/8. Объем 12 печ.л.
Тираж 500 экз
Отпечатано в типографии
ФГБНУ ФНАЦ ВИМ.

© ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, 2025

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Андрей Юрьевич Измайлов

доктор технических наук, профессор, академик Российской академии наук, член Президиума Российской академии наук, директор Федерального научного агроинженерного центра ВИМ, Москва, Российская Федерация, https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=527153

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Яков Петрович Лобачевский (НАУЧНЫЙ РЕДАКТОР)

доктор технических наук, профессор, академик Российской академии наук, академик-секретарь Отделения сельскохозяйственных наук Российской академии наук, Москва, Российская Федерация, https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=369308

Алексей Семенович Дорохов

доктор технических наук, профессор, академик Российской академии наук, заместитель директора по на-
учно-организационной работе Федерального научного агроинженерного центра ВИМ, Москва, Российская
Федерация, https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=550644

Михаил Никитиевич Ерохин

доктор технических наук, профессор, академик Российской академии наук, Российский государственный
аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия имени К.А. Тимирязева, Москва, Рос-
сийская Федерация, https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=626708

Юрий Анатольевич Иванов

доктор сельскохозяйственных наук, профессор, академик Российской академии наук, главный научный со-
трудник Федерального научного агроинженерного центра ВИМ, Москва, Российская Федерация,
https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=672993

Йошисукэ Кишида

академик, Президент компании «Шин-Норинша», г. Токио, Япония

Юрий Федорович Лачуга

доктор технических наук, профессор, академик Российской академии наук, член Президиума Российской
академии наук, Москва, Российская Федерация, https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=365637

Антонин Махалек

доктор технических наук, директор Научно-исследовательского института сельскохозяйственной техники,
г. Прага, Чешская Республика

Владимир Дмитриевич Попов

доктор технических наук, профессор, академик Российской академии наук, руководитель научного на-
правления Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства,
Санкт-Петербург, Российская Федерация, https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=684252

Синьминь Лю

профессор, ректор Циндаоского аграрного университета, г. Циндао, Китайская Народная Республика

Жарылкасын Сарсембекович Садыков

доктор технических наук, профессор, директор Научно-исследовательского института агроинженерных проб-
лем и новых технологий Казахского национального агроуниверситета, г. Алматы, Республика Казахстан

Даврон Рустамович Норчаев

доктор технических наук, старший научный сотрудник, руководитель лаборатории «Механизации садовод-
ства и овощеводства» Научно-исследовательского института механизации сельского хозяйства Респуб-
лики Узбекистан, г. Карши, Кашкадарьинская область, Республика Узбекистан

Юлия Сергеевна Ценц

доктор технических наук, доцент, член-корреспондент Российской академии наук, заместитель директора
по образовательной и редакционно-издательской деятельности Федерального научного агроинженерного
центра ВИМ, Москва, Российская Федерация,
https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=816741

Вячеслав Иванович Черноиванов

доктор технических наук, профессор, академик Российской академии наук, Федеральный научный
агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация, https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=552570

Роман Алексеевич Фандо

доктор исторических наук, директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Инсти-
тут истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова Российской академии наук, Москва, Российская
Федерация, https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=124382



SCIENTIFIC-PRACTICAL JOURNAL
Founded in 2007

The journal is registered
by Federal Agency for Supervision
of Legislation Observance of Mass
Communications Sphere
and Cultural Heritage Protection
Certificate ПИ No. ФС77-84201
from November, 22, 2022

The Journal is included in the list
of peer-reviewed scientific
publications recommended
by the Higher Attestation Commission
for publishing the research results
of studies and theses for Ph.D. and
Dr.Sc. degrees in scientific
specialties 4.1.5 / 4.3.1 / 4.3.2 / 5.6.6.

The journal is included in the
Russian Index of Scientific Citation
(RISC).

Full texts of articles are placed on
the website of electronic library:
elibrary.ru

Protected by the Russian Federal
Law RF №5351-1 "On Copyright
and Related Rights" dated July 9,
1993. Content is distributed under
Creative Commons Attribution 4.0
License. Violations are subject to
prosecution.

EXECUTIVE EDITORS:

Bizhaev V.V.,
Bykovskaya G.V.,
Gorelova L.A.,
Nurbagandova R.M.
Translation into English –
Svetlana Sorokina

EDITORIAL OFFICE'S ADDRESS

109428, Moscow,
1st Institutskiy proezd, 5, bild. 1.
Tel.: +7 (499) 174-88-11
+7 (499) 174-89-01

<http://www.vimsmit.com>
e-mail: smit@vim.ru

[SEL'SKOKHOZYAYSTVENNYE MASHINY I TEKHNOLOGII]

Founder and publisher: Federal State Budgetary Scientific Institution
"Federal Scientific Agroengineering Center VIM" of the Russian Academy of Sciences

EDITOR-IN-CHIEF

Andrey Yu. Izmaylov

Dr.Sc.(Eng.), Professor, Member of the Russian Academy of Sciences, Academic Board Member of the Russian Academy of Sciences, Director of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

EDITORIAL BOARD

Yakov P. Lobachevskiy (SCIENTIFIC EDITOR)

Dr.Sc.(Eng.), Professor, Member of the Russian Academy of Sciences, Academician Secretary of Department of Agricultural Sciences at the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Aleksey S. Dorokhov

Dr.Sc.(Eng.), Professor, Member of the Russian Academy of Sciences, Deputy Director for Scientific and Organizational Work of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Mikhail N. Erokhin

Dr.Sc.(Eng.), Professor, Member of the Russian Academy of Sciences, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation

Yuriy A. Ivanov

Dr.Sc.(Agr.), Professor, Member of the Russian Academy of Sciences; Chief Researcher of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Yoshisuke Kishida

Academician, President Shin-Norinsha Co., LTD, Tokyo, Japan

Yuriy F. Lachuga

Dr.Sc.(Eng.), Professor, Member of the Russian Academy of Sciences, Academic Board Member of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Antonin Makhalek

Dr.Sc.(Eng.), Director of the Agricultural Machinery Research Institute, Prague, Czech Republic

Vladimir D. Popov

Dr.Sc.(Eng.), Professor, Member of the Russian Academy of Sciences, Head of the Research Direction of the Institute of Agroengineering and Environmental Problems of Agricultural Production, St.Peterburg, Russian Federation

Xinmin Liu

Professor, Rector of Qingdao Agricultural University, Qingdao, People's Republic of China

Zharylkasyn S. Sadykov

Dr.Sc.(Eng.), Professor, Director of Research Institute of Agroengineering Problems and New Technologies, Kazakh National Agrarian University, Almaty, Republic of Kazakhstan

Davron R. Norchaev

Dr.Sc.(Eng.), Senior Researcher, Head of the «Mechanization of Horticulture and Vegetable Growing» Laboratory of the Scientific Research Institute of Agricultural Mechanization of the Republic of Uzbekistan, Karshi city, Kashkadarya region, Republic of Uzbekistan

Yuliya S. Tsench

Dr.Sc.(Eng.), Associate Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Deputy Director for Educational, Editorial and Publishing Activities of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Vyacheslav I. Chernouvanov

Dr.Sc.(Eng.), Professor, Member of the Russian Academy of Sciences, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Roman A. Fando

Dr.Sc.(Hist.), Director of the Federal State Budgetary Institution of Science S.I. Vavilov Institute of History of Natural Science and Technology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

The opinion of the editorial board does not always coincide with the position of the authors of publications. Responsibility for the accuracy of the stated facts and correctness citations are carried by the authors. Articles not accepted for publication are not returned and are not reviewed.

Published 4 times a year (open price).

Publication date is 15.12.2025.

The format is 60 x 90/8. The volume is 12 print's sheets. The circulation is 500 copies.

Printed by FSBSI FSAC VIM.



ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ

- Измайлов А.Ю., Букреев А.В., Соловьев Р.Ю., Соловьев Р.Р., Даненков И.Д.**
Электронная система управления последовательного гибридного трактора с мотор-колесами 4
- Кирсанов В.В., Иванов Ю.А., Кирсанов С.В., Ружин С.С.**
Экспериментальные исследования левитирующей модели доильной платформы карусельного типа 13
- Сибирёв А.В., Овчинников А.Ю., Тетерин В.С., Панферов Н.С., Пехнов С.А.**
Сравнение подходов глубокого обучения к распознаванию заболевших растений картофеля ... 21
- Ростовцев Р.А., Черников В.Г., Перов Г.А., Романенко В.Ю., Перов М.Г.**
Условие подъема лент льнотресты подбирающим барабаном 29
- Алдошин Н.В., Золотарев А.С., Квас С.А.**
Известкование почв – путь к повышению эффективности растениеводства 35
- Чулков А.С., Юферев Л.Ю., Масчев О.В.**
Роботизированная сеялка зерновых, зернобобовых и других культур для первого этапа работ селекции ... 42

ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ. ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ

- Альт В.В., Солошенко А.А., Исакова С.П., Савченко О.Ф., Елкин О.В.**
Применение БПЛА для мониторинга и ухода за посевами зерновых культур 49
- Акпасов А.П., Туктаров Р.Б., Кадомцева М.Е., Греков Д.А.**
Оценка потребности сельского хозяйства в технологиях точного земледелия 57
- Шереушев М.А., Дышеков А.И., Девяткин Ф.В.**
Внедрение коллаборативной робототехники для сбора плодовой продукции 66
- Комков И.В., Довлатов И.М.**
Математический аппарат контроллера с интеграцией этологических маркеров теплового стресса 75

ТЕХНИКА ДЛЯ ЖИВОТНОВОДСТВА

- Барагунов А.Б., Кудяев З.Р.**
Технические решения для механизированного производства продуктов животноводства в условиях альпийских пастбищ 84
- Скорыходов Д.М., Павлов А.С.**
Установка для ускоренных испытаний рабочих органов машин в животноводстве 91

INNOVATIVE TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT

- Izmaylov A.Yu., Bukreev A.V., Solovyov R.Yu., Solovyov R.R., Danenkov I.D.**
Electronic control system for a series hybrid tractor with in-wheel motors 4
- Kirsanov V.V., Ivanov Yu.A., Kirsanov S.V., Ruzin S.S.**
Experimental study of a levitating carousel-type milking platform 13
- Sibirev A.V., Ovchinnikov A.Yu., Teterin V.S., Panferov N.S., Pekhnov S.A.**
Comparison of deep learning approaches for detecting diseased potato plants 21
- Rostovtsev R.A., Chernikov V.G., Perov G.A., Romanenko V.Yu., Perov M.G.**
The condition for lifting flax retted straw ribbons by the pickup drum 29
- Aldoshin N.V., Zolotarev A.S., Kvas S.A.**
Soil liming as a way to increase crop production efficiency 35
- Chulkov A.S., Yuferev L.Yu., Maschev O.V.**
Robotic seeder for cereals, legumes, and other crops in early-stage breeding trials 42

DIGITAL TECHNOLOGIES. ARTIFICIAL INTELLIGENCE

- Alt V.V., Soloshenko A.A., Isakova S.P., Savchenko O.F., Elkin O.V.**
Use of UAVs in agriculture for monitoring and management of cereal crops 49
- Akpasov A.P., Tuktarov R.B., Kadomtseva M.Ye., Grekov D.A.**
Evaluating the need for precision farming technologies in the agricultural sector 57
- Shereuzhev M.A., Dyshekov A.I., Devyatkin F.V.**
Adoption of collaborative robotics in fruit harvesting 66
- Komkov I.V., Dovlatov I.M.**
Mathematical framework for a heat stress control system integrating behavioral markers 75

EQUIPMENT FOR ANIMAL HUSBANDRY

- Baragunov A.B. Kudaev Z.R.**
Technical solutions for mechanized livestock production under alpine pasture conditions 84
- Skorokhodov D.M., Pavlov A.S.**
Accelerated testing installation for working parts of livestock machinery 91



Электронная система управления последовательного гибридного трактора с мотор-колесами

Андрей Юрьевич Измайлов¹,
доктор технических наук, профессор,
академик Российской академии наук,
член Президиума РАН, директор,
e-mail: vim@vim.ru;

Алексей Валерьевич Букреев¹,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
e-mail: vim@aleksey-bukreev.ru;

Рудольф Юрьевич Соловьев¹,
кандидат технических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: rudsol@mail.ru;

Роман Рудольфович Соловьев¹,
младший научный сотрудник,
e-mail: soll.rom@yandex.ru;

Иван Дмитриевич Даненков²,
аспирант, инженер,
e-mail: vano755557@gmail.com

¹Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация;

²Государственный научный центр Российской Федерации ФГУП НАМИ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Сельское хозяйство все меньше зависит от традиционных механических систем по мере внедрения интеллектуальных систем управления. Использование адаптивных алгоритмов и нейронных сетей позволяет оптимизировать работу двигателей, аккумуляторов и гидравлических систем при переменной нагрузке и сложных условиях эксплуатации. (*Цель исследования*) Разработать электронную систему управления (ЭСУ) для последовательного гибридного трактора с мотор-колесами. (*Материалы и методы*) Исследования включали анализ компонентов гибридного трактора, таких как дизель-генератор, тяговая батарея, мотор-колеса и электронные блоки управления (ЭБУ). В основе архитектуры лежит использование микропроцессорных модулей с системами обратной связи (в основном CAN-шина для обмена данными), а также разрабатываются модели алгоритмов управления для обеспечения точной и адаптивной работы систем с учетом динамических условий эксплуатации. (*Результаты и обсуждение*) Предлагаемая электронная система управления позволяет повысить энергетическую эффективность и экологическую безопасность последовательного гибридного трактора с мотор-колесами. Внедрение адаптивных алгоритмов позволяет увеличить коэффициент полезного действия дизельного двигателя-генератора до 42 процентов, снизить расход топлива на 12-15 процентов и уменьшить выбросы CO₂ на 15 процентов. Точные системы гидравлики и торможения обеспечивают снижение тормозного пути на 8-12 процентов, а нейронные сети позволяют прогнозировать параметры торможения с точностью до 95 процентов. Модернизированные аккумуляторные системы демонстрируют стабильную работу при температурах от 0 до 100 градусов Цельсия, что способствует долговечности и надежности оборудования. Эти результаты подтверждают перспективность применения интеллектуальных систем для повышения эффективности и экологической безопасности сельскохозяйственной техники. (*Выводы*) Разработанная электронная система управления позволяет оптимизировать работу компонентов сельскохозяйственной техники последовательного гибридного трактора с мотор-колесами. Адаптивное и точное регулирование параметров в реальном времени улучшает маневренность и безопасность работы трактора в различных условиях эксплуатации, что способствует продлению срока службы компонентов и повышению производительности.

Ключевые слова: гибридный трактор, электронная система управления, мотор-колеса, энергоэффективность, алгоритмы управления, экологические технологии.

■ **Для цитирования:** Измайлов А.Ю., Букреев А.В., Соловьев Р.Ю., Соловьев Р.Р., Даненков И.Д. Электронная система управления последовательного гибридного трактора с мотор-колесами // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2025. Т. 19. N4, С. 4-12. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-4-4-12. EDN: XYJQJR.

Scientific article

Electronic Control System for a Series Hybrid Tractor with In-Wheel Motors

Andrey Yu. Izmaylov¹,
Dr.Sc.(Eng.), professor, member of the Russian Academy
of Sciences, member of the Presidium of the Russian
Academy of Sciences, director,
e-mail: vim@vim.ru;

Alexey V. Bukreev¹,
Ph.D.(Eng.), senior researcher, head of laboratory,
e-mail: vim@aleksey-bukreev.ru;

Rudolf Yu. Solovyov¹,
Ph.D.(Eng.), associate professor,
leading researcher,
e-mail: rudsol@mail.ru;

Roman R. Solovyov¹,
junior researcher,
e-mail: soll.rom@yandex.ru;

Ivan D. Danenkov²,
Ph.D. student (Eng.), engineer,
e-mail: vano755557@gmail.com

¹Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation;

²State Scientific Center of the Russian Federation FSUE NAMI, Moscow, Russian Federation

Abstract. Modern agriculture is becoming less dependent on traditional mechanical systems with the introduction of intelligent control systems. These systems utilize adaptive algorithms and neural networks to optimize the operation of engines, batteries, and hydraulic systems under variable loads and complex operating conditions. (*Research purpose*) To develop an electronic control system for a series hybrid tractor equipped with in-wheel motors. (*Materials and methods*) The study involved an analysis of the hybrid tractor components, including the diesel generator, traction battery, in-wheel motors, and electronic control units. The system architecture is based on microprocessor modules with feedback mechanisms (primarily using the CAN bus for data exchange). Control algorithm models were developed to ensure precise and adaptive system performance under dynamic operating conditions. (*Results and discussion*) The implementation of adaptive algorithms increases the efficiency of the diesel engine-generator by 42%, reduces fuel consumption by 12-15%, and decreases CO₂ emissions by 15%. The precision hydraulic and braking systems shorten the braking distance by 8–12%, while neural networks enable prediction of braking parameters with up to 95% accuracy. In addition, the upgraded battery systems maintain stable operation across a wide temperature range from 0 to 100°C, contributing to the durability and reliability of the equipment. These results confirm the potential of intelligent control systems to enhance both the efficiency and environmental sustainability of agricultural machinery. (*Conclusions*) The developed electronic control system optimizes the performance of the components in a series hybrid tractor with in-wheel motors, enabling adaptive and precise real-time regulation of operational parameters. It improves enhances the tractor's maneuverability and operational safety under varying field conditions. Ultimately, it leads to a longer component lifespan and improved overall productivity.

Keywords: hybrid tractor, electronic control system, in-wheel motors, energy efficiency, control algorithms, environmental technologies.

■ For citation: Izmaylov A.Yu., Bukreev A.V., Solovyov R.Yu., Solovyov R.R., Danenkov I.D. Electronic control system for a series hybrid tractor with in-wheel motors. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N4. 4-12 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-4-4-12. EDN: XYJQJR.

Современное сельское хозяйство сталкивается с двойным вызовом: необходимостью повышения производительности техники и одновременным снижением экологического следа. По данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (ФАО), на сельхозтехнику приходится до 15% глобальных выбросов CO₂, при этом традиционные тракторы с двигателем внутреннего сгорания (ДВС) демонстрируют КПД не более 35-40% из-за неоптимальных режимов работы двигателя и потерь в механической трансмиссии [1]. Эти факторы стимулируют разработку альтернативных силовых установок, среди которых последовательные гибридные системы с мотор-колесами занимают особое место [2, 3]. Их ключевое преимущество – разделение функций генерации энергии (ДВС) и ее преобразование в движение (электропривод) позволяет работать двигателю в зоне максимального КПД, а также реализовать прецизионное управление тягой [4]. Установили, что наиболее эффективным является электриче-

ский бесщеточный двигатель постоянного тока, удельная стоимость энергии которого (15-27 руб/кВт·ч) в 1,5-1,8 раза ниже, чем у дизельного двигателя, при максимальном КПД 95% [5]. Оптимальным источником питания для такого электропривода служат литий-ионные аккумуляторы, характеризующиеся высокой удельной энергоемкостью (432-864 кДж/кг) и низкой стоимостью единицы энергии (5-45 руб/кДж).

Последовательная гибридная схема подразумевает, что ДВС не связан напрямую с колесами, а работает только для выработки электроэнергии через генератор, который заряжает тяговую батарею или напрямую питает мотор-колеса. Такая система требует глубокой междисциплинарной разработки, включая электротехнику, алгоритмы управления и энергетику. Ее внедрение позволяет создать трактор нового поколения с повышенной эффективностью и минимальным воздействием на окружающую среду [6, 7].

Несмотря на прогресс, внедрение таких систем сдерживается рядом проблем.

Во-первых, алгоритмы управления часто не учитывают динамическую природу сельскохозяйственных операций. Например, при переходе от транспортировки грузов (постоянная нагрузка) к вспашке (циклическая нагрузка) ДВС-генератор может работать в неоптимальных режимах, увеличивая расход топлива на 12-15% [8]. Регулирование частоты вращения вала двигателя в зависимости от нагрузки позволяет снизить удельный расход топлива на 30% и более, повышая энергоэффективность агрегатов [9]. Во-вторых, большинство электронных систем управления используют статические карты управления, не способные адаптироваться к изменениям грунта, его влажности или уклонам [10]. В-третьих, несовместимость протоколов связи между компонентами от разных производителей увеличивает стоимость разработки.

Цель исследования: предложить новую архитектуру электронной системы управления (ЭСУ) последовательного гибридного трактора с мотор-колесами.

Материалы и методы. Основные компоненты последовательного гибридного трактора с мотор-колесами (*таблица*) включают ДВС-генератор, тяговую батарею, мотор-колеса, инверторы и электронные блоки управления (ЭБУ). Каждый элемент играет критическую роль в оптимизации энергопотоков и адаптации к условиям эксплуатации.

ЭСУ представляет собой совокупность многофункциональных вычислительных модулей, обеспечивающих координацию отдельных компонентов последовательной гибридной системы трактора. В основе ЭСУ лежит принцип обратной связи: система постоянно отслеживает различные параметры работы трактора со всех ЭБУ и на основе заданных алгоритмов выдает управляющие сигналы, чтобы поддерживать работу систем в оптимальном режиме.

Для обмена данными между всеми модулями используется цифровая коммуникационная шина (CAN-шина) [11]. CAN-шина – это стандарт промышленной сети, разработанный специально для автомобильной промышленности. Она позволяет обме-

ниваться данными по двум проводам, обеспечивая надежную и быструю передачу информации.

Результаты и обсуждение. Разработана структурная схема ЭСУ последовательного гибридного трактора с мотор-колесами (*рис. 1*).

ЭБУ двигателем внутреннего сгорания регулирует работу ДВС в соответствии с нагрузкой на генератор и уровнем заряда батареи. Принцип работы основан на поддержании оборотов в диапазоне, соответствующем зоне максимального КПД. Его алгоритмы управления базируются на нелинейной модели предиктивного контроля, которая минимизирует целевую функцию, включающую расход топлива и уровень выбросов.

Двигатель внутреннего сгорания функционирует в режиме изохронного регулирования, частота вращения вала поддерживается в диапазоне 1500-2000 об/мин, что соответствует максимальному эффективному КПД (до 42%). Динамическая калибровка впрыска топлива осуществляется на основе данных датчиков давления в цилиндрах и лямбда-зондов. Использование методики определения многопараметровой характеристики удельного расхода топлива двигателя [12] на основе данных CAN-шины, получаемых в режиме реального времени, позволяет оптимизировать эксплуатационные режимы ДВС.

Каждое мотор-колесо оснащено трехфазным синхронно-реактивным двигателем, управляемым инвертором с ШИМ-модуляцией на базе IGBT-модулей. ЭБУ инвертором реализует векторное управление моментом (FOC) через преобразование Кларка-Парка, с обратной связью по положению угла ротора θ (энкодеры или резольверы). Основные принципы векторного управления моментом заключаются в преобразовании координат. Для начала выполняется измерение токов статора (I_a, I_b, I_c) (возможно измерение только токов двух фаз I_a и I_c).

Затем выполняется преобразование Кларка (α - β) по выражениям (1) и (2), переход от трехфазной системы статора (I_a, I_b, I_c) к двухфазной неподвижной системе координат (I_α, I_β) (*рис. 2*).

Таблица		Table	
ОСНОВНЫЕ КОМПОНЕНТЫ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ГИБРИДНОГО ТРАКТОРА С МОТОР-КОЛЕСАМИ MAIN COMPONENTS OF A SERIES HYBRID TRACTOR WITH IN-WHEEL MOTORS			
Компонент	Характеристика		
ДВС-генератор	Дизельный двигатель с генератором для зарядки батареи		
Тяговая батарея	Аккумулятор с системой терморегуляции		
Мотор-колеса	Четыре синхронно-реактивных электродвигателя с независимым управлением		
Инверторы	DC-AC преобразователи для синхронно-реактивных электродвигателей		
Электронные блоки управления (ЭБУ)	В зависимости от комплектации могут быть электронные блоки управления тормозной системой (ABS/ESP), подвеской, рулевым управлением, кузовной электроникой (BCM), приборной панелью, мультимедиа, навигацией и т.д. Каждый блок имеет схожую архитектуру с микропроцессором, памятью, входами/выходами и коммуникационными интерфейсами, но специализируется на управлении определенной системой		

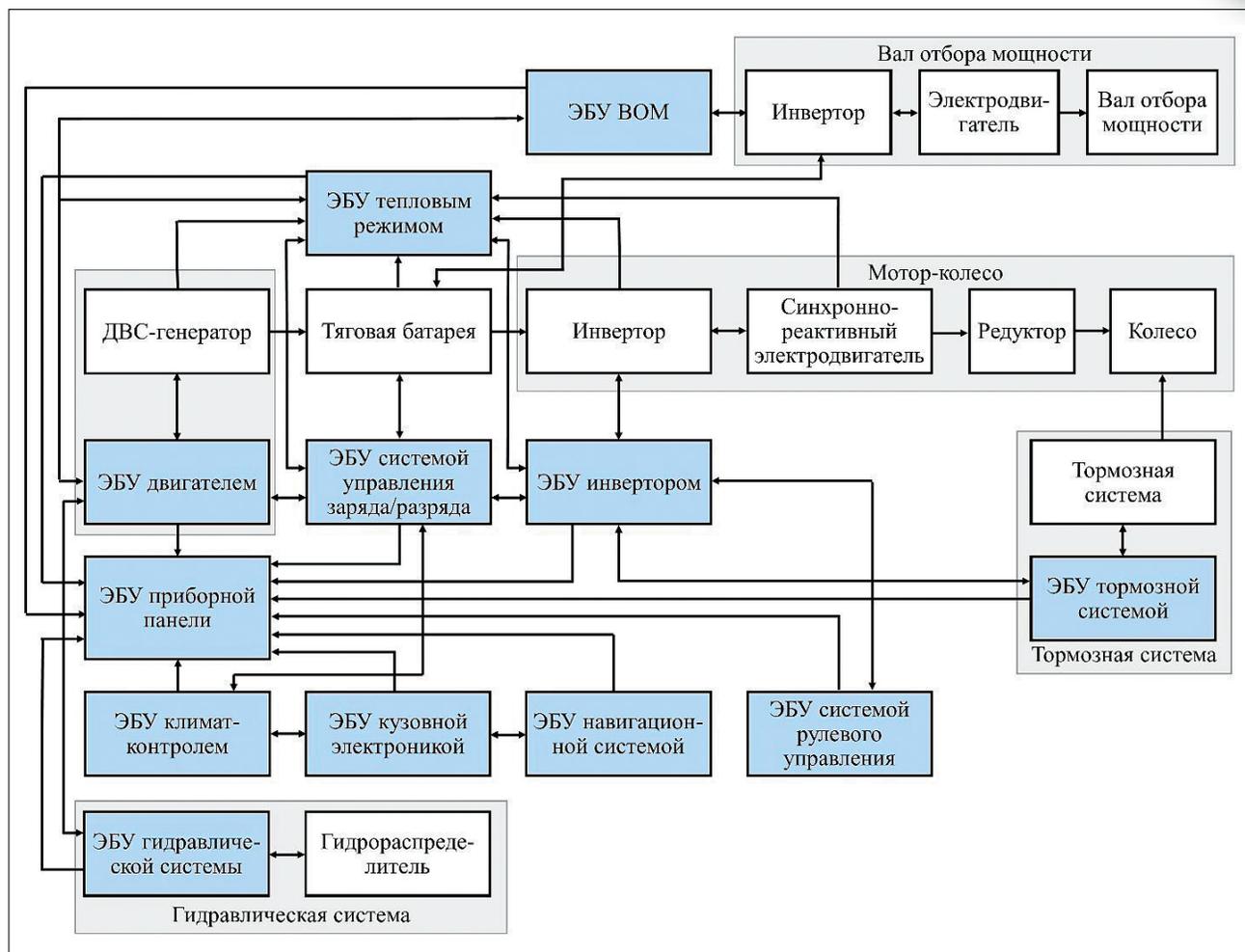


Рис. 1. Структурная схема электронной системы управления (ЭСУ) последовательного гибридного трактора с мотор-колесами

Fig. 1. Block diagram of the Electronic Control System (ECS) of a series hybrid tractor with in-wheel motors

$$I_\alpha = I_a,$$

$$I_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}}(I_a + 2I_b).$$

- (1) После этого выполняется преобразование Парка ($d-q$), т.е. переход от системы $\alpha-\beta$ к вращающейся системе координат, связанной с ротором (I_d, I_q) (рис. 3).
- (2)

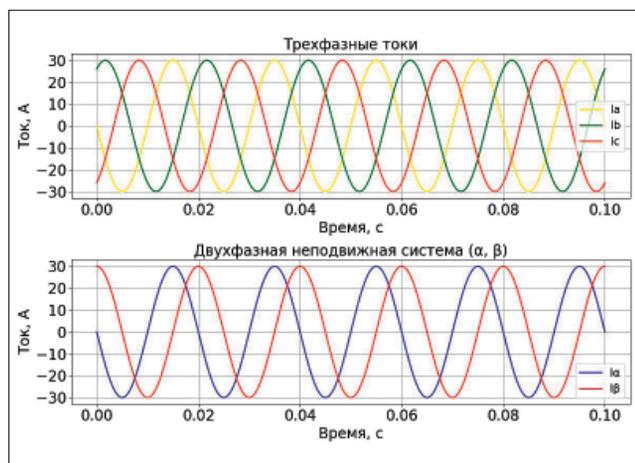


Рис. 2. Переход от трехфазной системы к двухфазной неподвижной системе координат

Fig. 2. Transition from a three-phase system to a two-phase stationary coordinate system

$$I_d = I_\alpha \cos \theta + I_\beta \sin \theta, \tag{3}$$

$$I_q = -I_\alpha \sin \theta + I_\beta \cos \theta, \tag{4}$$

где θ – угол положения ротора; I_d – ток намагничивания управляет магнитным потоком; I_q – моментный ток управляет моментом двигателя.

Регуляторы тока для I_d и I_q сравнивают заданные и измеренные значения, формируя управляющие напряжения V_d и V_q .

После происходит обратное преобразование Парка и Кларка, преобразование V_d и V_q обратно в трехфазные напряжения (V_a, V_b, V_c) для ШИМ-модуляции инвертора. Инвертор формирует управляющие импульсы для двигателя.

В условиях неравномерного сцепления (например, на влажном грунте) система перераспределя-

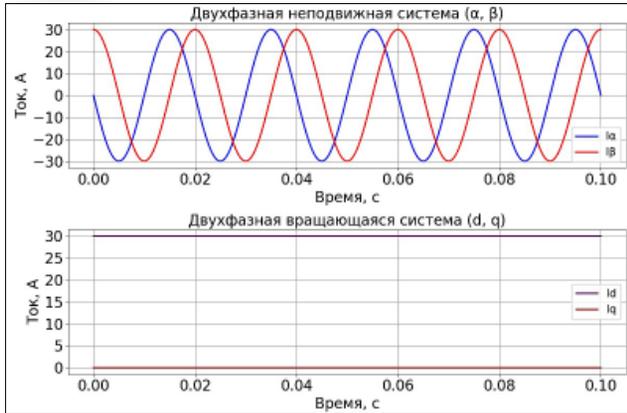


Рис. 3. Переход от двухфазной неподвижной системы координат к двухфазной вращающейся системе координат
 Fig. 3. Transition from a two-phase stationary coordinate system to a two-phase rotating coordinate system

ет крутящий момент между колесами, снижая энергопотери на 15-20%. Временная задержка системы управления не превышает 50 мс, что обеспечивает выполнение условия Найквиста (критерия Найквиста) для частот до 10 Гц.

ЭБУ системой управления заряда/разряда тяговой батареи контролирует ячейки тяговой батареи. Для предотвращения деградации используется активная балансировка с точностью ± 5 мВ. Тепловая модель, интегрированная в ЭБУ, регулирует температуру в диапазоне 15-35 °C посредством жидкостного охлаждения. При пиковых нагрузках (подъеме на уклон 20%, вспашке и т.д.) система ограничивает разрядный ток, что увеличивает ресурс батареи на 30% по сравнению с пассивным управлением. При пиковых нагрузках ЭБУ ограничивает глубину разряда до 70%, увеличивая срок службы батареи. Предиктивный алгоритм на основе модели Тевенина [13] оценивает остаточную емкость с учетом циклов заряда/разряда и температуры.

Модель Тевенина записывается выражением:

$$U_{ак}(t) = \frac{1}{\tau} (I_{ак}(t)R_s + E_0 - U_{ак}(t)), \quad (5)$$

где $U_{ак}(t)$ – напряжение батареи; $I_{ак}(t)$ – ток батареи; R_s – полное внутреннее сопротивление; E_0 – ЭДС батареи; τ – постоянная времени.

Параметры модели Тевенина для всей разрядной характеристики батареи определяются с помощью интерполяции.

В качестве узлов интерполяции выбираются фиксированные значения параметров в точках разрядной кривой, соответствующих заданным уровням степени заряженности SOC:

$$SOC_j = SOC_{j-1} + k (U_{ак_{j-1}} - \hat{U}_{ак_{j-1}}), \quad (6)$$

где $U_{ак_{j-1}}$ – измеренное напряжение батареи; $\hat{U}_{ак_{j-1}}$ – оценка напряжения на основе модели; k – коэффициент пропорциональности.

$$k = \frac{1}{U_{max}}, \quad (7)$$

где U_{max} – напряжение полностью заряженной батареи.

В модели (5) параметры E_0 , τ и полная емкость Q_0 связаны с температурой T линейной зависимостью. Однако полное сопротивление $R_s(T)$ зависит от температуры нелинейно:

$$R_s(T) = R_s(T_{ref}) \cdot \exp\left(K_R \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right), \quad (8)$$

где T_{ref} – эталонная температура батареи; K_R – коэффициент, определяемый экспериментально.

K_R вычисляется по выражению:

$$K_R = -\frac{\ln\left(\frac{R_s(T_{min})}{R_s(T_{ref})}\right)}{\frac{1}{T_{min}} - \frac{1}{T_{ref}}}, \quad (9)$$

где T_{min} – минимально допустимая температура батареи.

В памяти ЭБУ системой управления заряда/разряда тяговой батареи хранятся параметры модели, определенные при нормальной (T_{ref}) и минимальной (T_{min}) величине температуры тяговой батареи.

Для расчета параметров модели при текущей температуре выполняются следующие действия:

- расчет линейных зависимостей для параметров E_0 , τ и Q_0 ;
- определение коэффициента K_R ;
- на основе полученных коэффициентов вычисляются $E_0(T)$, $\tau(T)$, $R_s(T)$, $Q_0(T)$. Эти параметры используются в алгоритме оценки остаточной емкости батареи.

ЭБУ тепловым режимом играет критическую роль в обеспечении стабильности и долговечности компонентов гибридной системы. Данный блок координирует работу систем охлаждения и подогрева, поддерживая температурные параметры в оптимальных диапазонах для батареи, электродвигателей, инверторов и вспомогательных устройств. В исследовании [14] изучено влияние низких температур на параметры гелевых тяговых аккумуляторов электротранспорта. Результаты показали снижение времени работы на 33% по сравнению с режимом при 22-24 °C, что подтверждает необходимость учета температурного фактора при эксплуатации спецтехники.

Система управления тепловым режимом повышает надежность гибридной установки на 25%. При температуре тяговой батареи ниже 0 °C активируется предпусковой подогрев до достижения 15 °C, что снижает деградацию батареи на 20% [15]. В режиме заряда/разряда жидкостное охлаждение поддерживает температуру ячеек в диапазоне 25-35 °C (ΔT между ячейками ≤ 3 °C). При превышении температуры обмоток мотор-колес более 80 °C или ин-

верторов более 60 °С включается жидкостное охлаждение (этиленгликолевый теплоноситель циркулирует через алюминиевые радиаторы). В аварийных режимах ($T > 100$ °С) мощность мотор-колес ограничивается на 50%.

ЭБУ тормозной системы представляет собой высокотехнологичный вычислительный модуль, обеспечивающий точное и адаптивное управление процессами торможения. Его основная функция заключается в интеграции данных от сенсорных систем, анализе текущих динамических параметров движения и генерации управляющих сигналов для исполнительных механизмов, что позволяет реализовать комплексные алгоритмы повышения безопасности и эффективности торможения.

Ключевыми компонентами системы являются датчики скорости вращения колес на основе эффекта Холла с разрешением до 0,1°, инерциальные измерительные модули, включающие трехосевые акселерометры и гироскопы с точностью $\pm 0,5\%$, а также датчики давления в гидравлических магистралях с диапазоном измерений 0-300 бар и погрешностью менее 1%. Применение автоматизированной системы с алгоритмом *ANN-PID*-контроллера [16] позволят автоматизировать управление тормозной педалью тракторов за счет анализа ключевых эксплуатационных параметров: типа рабочей поверхности, расстояния до препятствий и скорости передвижения (10-25 км/ч). Использование многослойной нейронной сети (*MLPNN 3-6-2*) обеспечит высокоточное прогнозирование положения тормозной педали и параметров замедления. Оптимизированные методом Циглера–Николса коэффициенты *PID*-регулятора позволят достичь эффективного торможения в различных условиях эксплуатации. При этом следует учитывать, что с ростом скорости от 10 до 25 км/ч будет наблюдаться пропорциональное увеличение тормозного пути и коэффициента проскальзывания независимо от типа поверхности (уплотненный грунт, вспаханное поле, асфальтовое покрытие). Полученные результаты открывают перспективы для внедрения интеллектуальных систем торможения в конструкции малогабаритной сельскохозяйственной техники нового поколения.

Как правило, в гибридных и электрических транспортных средствах ЭБУ тормозной системы интегрирован с системой рекуперативного торможения, где до 30% кинетической энергии преобразуется в электрическую. Однако системы рекуперации энергии демонстрируют низкую эффективность в условиях сельскохозяйственных работ. При движении по полю на скоростях 5-15 км/ч кинетическая энергия трактора минимальна, что снижает возврат энергии при торможении до 5-8%. Кроме того, частые остановки и запуски (например, при маневрировании) увеличивают циклы заряда/разряда батареи, ускоряя ее износ.

ЭБУ кузовной электроники представляет собой интегрированную подсистему, отвечающую за координацию функций, связанных с комфортом оператора, безопасностью и вспомогательными системами трактора [17].

В отличие от узкоспециализированных ЭБУ (двигателя, тормозной системы) данный модуль фокусируется на управлении периферийными устройствами, такими как освещение, климат-контроль, стеклоочистители, мультимедийные интерфейсы и системы связи.

Ключевой особенностью ЭБУ кузовной электроники является адаптивность к условиям эксплуатации. Например, система автоматически регулирует яркость внешнего освещения на основе данных датчиков освещенности и *GPS*-координат, учитывая время суток и погодные условия. Важным аспектом является интеграция с системами точного земледелия [18]. ЭБУ кузовной электроники взаимодействует с бортовым компьютером, обеспечивая передачу данных между навесным оборудованием и дисплеем оператора. Это позволяет визуализировать параметры работы плуга, сеялки или опрыскивателя в реальном времени, а также управлять ими через сенсорный интерфейс.

ЭБУ навигационной системы последовательно гибридного трактора с мотор-колесами представляет собой интегрированную платформу, обеспечивающую координацию пространственного позиционирования, маршрутизации и энергоэффективного управления движением в условиях точного земледелия. Данная система базируется на многоуровневой архитектуре, объединяющей глобальные навигационные спутниковые системы (*GNSS*), инерциальные измерительные модули, лидары, а также алгоритмы машинного обучения для адаптации к динамическим условиям эксплуатации [19]. Основная функция ЭБУ навигации заключается в минимизации энергопотребления гибридной силовой установки за счет оптимизации траектории движения, синхронизации работы мотор-колес и прогнозирования нагрузки на тяговую батарею.

ЭБУ климат-контролем представляет собой интеллектуальную подсистему, отвечающую за поддержание заданных параметров микроклимата в кабине оператора (температура, влажность, скорость воздушного потока) при минимальном энергопотреблении.

В условиях гибридной архитектуры, где тяговая батарея является ограниченным ресурсом, ключевой задачей ЭБУ становится оптимизация работы нагревательных, вентиляционных и охлаждающих устройств с учетом текущего состояния энергосистемы (уровень заряда тяговой батареи, нагрузка ДВС).

ЭБУ системой рулевого управления последовательного гибридного трактора с мотор-колесами представляет собой интеллектуальную платформу, обеспечивающую точное и адаптивное управление вектором движения в условиях переменной нагрузки, сложного рельефа и неоднородного сцепления с грунтом.

Данная система реализует принцип независимого управления мотор-колесами, что позволяет исключить традиционные механические компоненты (рулевые тяги, гидроусилители) и перейти к полностью электронному регулированию угла поворота и крутящего момента на каждом колесе. Основная задача ЭБУ заключается в синтезе сигналов от датчиков, прогнозировании динамических параметров движения и генерации управляющих воздействий, оптимизирующих энергопотребление и маневренность трактора.

ЭБУ приборной панелью является центральным интерфейсом взаимодействия оператора с системой трактора, обеспечивая визуализацию критических параметров, диагностику неисправностей и управление базовыми функциями. Основная задача ЭБУ – агрегация данных от датчиков, всех ЭБУ с последующей их обработкой и выводом на дисплей в формате, адаптированном для оператора.

ЭБУ валом отбора мощности (ВОМ) представляет собой интеллектуальную подсистему, обеспечивающую точное регулирование скорости и крутящего момента на валу, подключенном к навесному оборудованию (например, опрыскивателям, сеялкам, косилкам). В отличие от традиционных систем с механическим приводом от двигателя внутреннего сгорания, в данной архитектуре ВОМ питается от тягового электродвигателя, управляемого инвертором напряжения, что позволяет реализовать адаптивное управление с обратной связью по параметрам нагрузки и энергоэффективности.

ЭБУ гидравлической системой представляет собой интегрированную платформу, обеспечивающую точное регулирование параметров рабочей жидкости (давление, расход, направление) в режиме реального времени. Данная система заменяет механические и гидромеханические системы, реализуя адаптивное управление пропорциональ-

ми или сервоклапанами гидрораспределителя, что повышает энергоэффективность, точность позиционирования навесного оборудования и устойчивость к переменным нагрузкам.

Основная задача гидравлической системы ЭБУ состоит в координации работы гидравлического контура с учетом текущих требований к выполнению сельскохозяйственных операций (вспашка, подъем плуга, работа с фронтальными погрузчиками) и минимизация потерь энергии.

Выводы. В результате исследования разработаны ключевые аспекты, касающиеся внедрения электронной системы управления (ЭСУ) для последовательного гибридного трактора с мотор-колесами.

Внедрение гибридных тракторов с улучшенной ЭСУ способно существенно снизить углеродный след сельского хозяйства, который на данный момент составляет около 15% от суммарных объемов глобальных выбросов CO₂. Это стало особенно актуальным в свете глобальных изменений климата и ужесточения международных требований по снижению выбросов.

Последовательные гибридные системы представляют собой перспективное направление в сельском хозяйстве благодаря их уникальной архитектуре, где дизельный двигатель (ДВС) используется исключительно для генерации электроэнергии. Это позволяет двигателю работать в оптимальных режимах, что в свою очередь увеличивает его КПД до 42%, и значительно снижает расход топлива и выбросы CO₂.

Современные алгоритмы управления часто не учитывают динамические изменения, возникающие в процессе сельскохозяйственных работ, что может приводить к увеличению расхода топлива до 12-15%. Разработанная ЭСУ включает адаптивные алгоритмы, способные реагировать на изменения условий, такие как тип грунта, влажность и тип нагрузки, что способствует более эффективному использованию ресурсов.

Применение адаптивного управления, особенно с учетом динамических условий работы, может значительно продлить срок службы компонентов, таких как аккумуляторы и мотор-колеса, за счет оптимизации циклов заряда и разряда, а также предотвращения излишних нагрузок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фомин В.М. Анализ перспектив освоения водородных ресурсов в структуре энергопотребления АПК // *Тракторы и сельхозмашины*. 2014. №9. С. 11-14. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-65480>.
2. Дорохов А.С., Никитин Е.А., Павкин Д.Ю. Колесные роботизированные технические средства: опыт и перспективы использования на животноводческих комплексах // *Техника и оборудование для села*. 2022. №4(298). С. 16-21. DOI: 10.33267/2072-9642-2022-4-16-21.
3. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Дорохов А.С. и др. Современные технологии и техника для сельского хозяйства – тенденции выставки AGRITECHNIKA 2019 // *Тракторы и сельхозмашины*. 2020. №6. С. 28-40. DOI: 10.31992/0321-4443-2020-6-28-40.
4. Раков В.А., Литвинов В.И. Анализ экономической эффективности применения гибридного и электрического

- го двигателей в тракторах // *АгроЗооТехника*. 2020. Т. 3. N3. С. 5. DOI: 10.15838/alt.2020.3.3.5.
5. Раков В.А., Литвинов В.И. Оценка экономической эффективности использования комбинированных и электрических энергоустановок в сельскохозяйственных машинах // *Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета*. 2020. N59. С. 123-128. DOI: 10.24411/2078-1318-2020-12123.
 6. Лачуга Ю.Ф., Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П. и др. Приоритетные направления научно-технического развития отечественного тракторостроения // *Техника и оборудование для села*. 2021. N2(284). С. 2-7. DOI: 10.33267/2072-9642-2021-2-2-7.
 7. Мазитов Н.К., Сахапов Р.Л., Шогенов Ю.Х. и др. Конкурентоспособный комплекс техники и технологии для производства зерна и кормов // *Аграрная Наука Евро-Северо-Востока*. 2019. Т. 20. N3. С. 299-308. DOI: 10.30766/2072-9081.2019.20.3.299-308.
 8. Завалишин В.В. Экономия топлива при генерации электроэнергии дизель-генераторной установкой с переменной частотой вращения дизеля // *Вестник Саратовского государственного технического университета*. 2010. N3 (46). С. 128-135.
 9. Дарьенков А.Б., Хватов О.С. Оценка средней за период эксплуатации дизель-генераторной установки переменной частоты вращения стоимости вырабатываемой электроэнергии // *Интеллектуальная электротехника*. 2020. N2(10). С. 29-42. DOI: 10.46960/2658-6754_2020_2_29.
 10. Карташов В.Я., Самойленко С.С. Особенности структурно-параметрической адаптации в цифровых системах мониторинга и управления // *Вестник Кемеровского государственного университета*. 2014. N2-1(58). С. 70-77.
 11. Совин К.Г., Андреева Д.В. Принцип работы CAN-шины сельскохозяйственной техники // *Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт*. 2019. N10. С. 69-71. EDN: BZDKSA.
 12. Девянин С.Н., Бижаев А.В., Павлов Я.Д. и др. Параметрическая характеристика двигателя трактора по удельному расходу топлива // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. N4. С. 68-74. DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-4-68-74.
 13. Хандорин М.М., Букреев В.Г. Методика оценки остаточной емкости литий-ионной аккумуляторной батареи при изменении температуры аккумулятора // *Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники*. 2017. Т. 20. N2. С. 120-122. DOI: 10.21293/1818-0442-2017-20-2-120-122.
 14. Дмитриев К.С. Испытания работоспособности аккумуляторных батарей электропривода транспортного средства // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование*. 2023. N4(72). С. 574-583. DOI: 10.32786/2071-9485-2023-04-58.
 15. Ситовский О.Ф., Деркач В.Л. Технология предпускового подогрева для подзаряжаемых гибридных электромобилей // *Вестник Брестского государственного технического университета. Машиностроение*. 2018. N4(112). С. 79-82. EDN: FCLSYQ.
 16. Pradhan N.Ch., Sahoo P.K., Kushwaha D.K. et al. ANN-PID based automatic braking control system for small agricultural tractors. *Journal of Field Robotics*. 2024. Vol. 41. N8. 2805-2831. DOI: 10.1002/rob.22393.
 17. Vasile I., Tudor E., Sburlan I. et al. Optimization of the electronic control unit of electric-powered agricultural vehicles. *World Electric Vehicle Journal*. 2023. Vol. 14. N10. 267. DOI: 10.3390/wevj14100267.
 18. Докин Б.Д., Алетдинова А.А. Анализ прошлого и будущего автоматизации растениеводства с развитием технологий точного земледелия // *Вестник АПК Ставрополья*. 2021. N1(41). С. 10-14. DOI: 10.31279/2222-9345-2021-10-41-10-14.
 19. Hossain M.S., Rahman M., Rahman A. et al. Automatic navigation and self-driving technology in agricultural machinery: a state-of-the-art systematic review. *IEEE Access*. 2025. Vol. 13. 94370-94401. DOI: 10.1109/ACCESS.2025.3573324.

REFERENCES

1. Fomin V.M. Analysis of development prospects of hydrogen resources in the energy use pattern of agroindustrial complex. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2014. N9. 11-14 (In Russian). EDN: UAHLYR.
2. Dorokhov A.S., Nikitin E.A., Pavkin D.Yu. Wheeled robotic technical tools: experience and prospects of use at livestock complexes. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2022. N4(298). 16-21 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2022-4-16-21.
3. Izmaylov A.Yu., Lobachevskiy Ya.P., Dorokhov A.S. et al. Modern agriculture technologies and equipment - trends of an Agritechnika 2019 exhibition. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2020. N6. 28-40 (In Russian). DOI: 10.31992/0321-4443-2020-6-28-40.
4. Rakov V.A., Litvinov V.I. Economic value analysis of using hybrid and electric motors in tractors. *Agricultural and Livestock Technology*. 2020. N3. 5 (In Russian). DOI: 10.15838/alt.2020.3.3.5.
5. Rakov V.A., Litvinov V.I. Economic efficiency assessment of hybrid and electric motors using in tractors. *Izvestiya Saint-Petersburg State Agrarian University*. 2020. N59. 123-128 (In Russian). DOI: 10.24411/2078-1318-2020-12123.
6. Lachuga Yu.F., Izmajlov A.Yu., Lobachevskij Ya.P. Priority areas of scientific and technical development of the domestic tractor industry. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2021. N2(284). 2-7 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2021-2-2-7.

7. Mazitov N.K., Sakhapov R.L., Shogenov Yu.Kh. et al. Competitive complex of machinery and technologies for the production of grain and feed. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2019. Vol. 20. N3. 299-308 (In Russian). DOI: 10.30766/2072-9081.2019.20.3.299-308.
8. Zavalishin V.V. Fuel economy in the process of electricity generating by diesel-generator set with variable frequency of diesel engine rotation. *Bulletin of the Saratov State Technical University*. 2010. N3 (46). 128-135 (In Russian).
9. Dar'enkov A.B., Khvatov O.S. Evaluation of average cost of generated electricity for operation period of variable speed diesel generator set. *Smart Electrical Engineering*. 2020. N2 (10). 29-42 (In Russian). DOI: 10.46960/2658-6754_2020_2_29.
10. Kartashov V.Ya., Samoilenko S.S. Peculiarities of structural and parametric adaptation in digital systems of monitoring and management. *Bulletin of Kemerovo State University*. 2014. N2-1 (58). 70-77 (In Russian).
11. Sovin K.G., Andreeva D.V. The principle of operation of the CAN bus for agricultural equipment. *Agricultural Machinery: Service and Repair*. 2019. N10. 69-71 (In Russian). EDN: BZDKSA.
12. Devyanin S.N., Bizhaev A.V., Pavlov Ya.D. et al. Parametric characterization of a tractor engine by specific fuel consumption. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023. Vol. 17. N4. 68-74 (In Russian). DOI:10.22314/2073-7599-2023-17-4-68-74.
13. Khandorin M.M., Bukreev V.G. Method to estimate the available capacity of a Lithium-ion battery when the battery temperature changes. *Proceedings of TUSUR University*. 2017. Vol. 20. N2. 120-122 (In Russian). DOI: 10.21293/1818-0442-2017-20-2-120-122.
14. Dmitriev K.S. Testing the performance of vehicle electric drive batteries. *Izvestia of the Lower Volga Agro-University Complex*. 2023. N4 (72). 574-583 (In Russian). DOI: 10.32786/2071-9485-2023-04-58.
15. Sitovsky O.F., Derkach V.L. Technology of the preheating for plug-in hybrid electric vehicle. *Vestnik of Brest State Technical University*. 2018. N4(112). 79-82 (In Russian). EDN: FCLSYQ.
16. Pradhan N.C., Sahoo P.K., Kushwaha D.K. et al. ANN-PID based automatic braking control system for small agricultural tractors. *Journal of Field Robotics*. 2024. Vol. 41. N8. 2805-2831 (In English). DOI: 10.1002/rob.22393.
17. Vasile I., Tudor E., Sburlan I. et al. Optimization of the electronic control unit of electric-powered agricultural vehicles. *World Electric Vehicle Journal*. 2023. Vol. 14. N10. 267 (In English). DOI: 10.3390/wevj14100267.
18. Dokin B.D., Aletdinova A.A. Analysis of the past and future of crop automation with the development of precision farming technologies. *Agricultural Bulletin of Stavropol Region*. 2021. N1(41). 10-14 (In Russian). DOI: 10.31279/2222-9345-2021-10-41-10-14.
19. Hossain M.S., Rahman M., Rahman A. et al. Automatic navigation and self-driving technology in agricultural machinery: a state-of-the-art systematic review. *IEEE Access*. 2025. Vol. 13. 94370-94401 (In English). DOI: 10.1109/ACCESS.2025.3573324.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Измайлов А.Ю. – научное руководство, формулирование основных целей и задач теоретических исследований, доработка текста;

Букреев А.В. – определение методологии исследования, разработка электронной системы управления, критический анализ и доработка решения, формирование общих выводов, итоговая переработка статьи;

Соловьев Р.Ю. – сбор и анализ материалов по теме исследования, разработка электронной системы управления, составление начального варианта статьи;

Соловьев Р.Р. – сбор и анализ материалов по теме исследования, составление начального варианта статьи, формирование общих выводов;

Даненков И.Д. – систематический отбор и всесторонний анализ научно-технической литературы и патентных источников по рассматриваемой

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Izmailov A.Yu. – scientific supervision, formulation of the main goals and objectives of theoretical research, revision of the manuscript;

Bukreev A.V. – development of the research methodology, development of the electronic control system, critical analysis and revision of the solution, formulation of the general conclusions, final revision of the manuscript;

Soloviev R.Yu. – collection and analysis of materials related to the research topic, development of the electronic control system, drafting the initial version of the manuscript;

Soloviev R.R. – collection and analysis of materials related to the research topic, drafting the initial version of the manuscript, formulation of the general conclusions;

Danenkov I.D. – systematic selection and comprehensive analysis of scientific and technical literature and patent sources related to the problem under consideration, drafting the initial version of the manuscript.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию

Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on

The paper was accepted for publication on

30.09.2025

18.11.2025

EDN: YEIBXY

DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-4-13-20



Научная статья

УДК 637.115:637.11



Экспериментальные исследования левитирующей модели доильной платформы карусельного типа

Владимир Вячеславович Кирсанов,
доктор технических наук, профессор,
член-корреспондент Российской академии наук,
e-mail: kirvv2014@mail.ru;

Юрий Анатольевич Иванов,
доктор сельскохозяйственных наук,
главный научный сотрудник,
академик Российской академии наук,
e-mail: ros-plem@mail.ru;

Сергей Владимирович Кирсанов,
аспирант,

e-mail: kirseryii@mail.ru;

Семен Сергеевич Рузин,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
e-mail: ruzin.s.s@yandex.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Проведенный ранее анализ показал перспективность использования технологии магнитного подвеса для создания левитирующей модели доильной платформы карусельного типа на постоянных магнитах и проведения ее экспериментальных исследований (*Цель исследования*) На основе предложенных технологических схем провести экспериментальные исследования и магнитостатический расчет левитирующей доильной платформы «Карусель» с использованием аксиально намагниченных постоянных магнитов прямоугольной формы. (*Материалы и методы*) Рассмотрено три варианта расположения постоянных аксиально намагниченных неодимовых магнитов кубической формы (0,01×0,01×0,01 метра) на подвижной вращающейся и неподвижной частях карусели и методика определения левитирующих и боковых зазоров между подвижными и неподвижными магнитами на холостом ходу и под нагрузкой. (*Результаты и обсуждение*) Разработана экспериментальная модель левитирующей доильной платформы карусельного типа на 24 места в масштабе (1:33), проведены экспериментальные исследования. Установлено, что наиболее предпочтительным вариантом является размещение магнитов друг над другом одноименными полюсами навстречу друг другу с тангенциальным зазором (0,004-0,002 метра) на подвижной и неподвижной частях платформы на окружностях одинакового радиуса. Левитирующий зазор между магнитами обратно пропорционален создаваемой нагрузке, которая увеличивается от 9 до 26,8 ньютона с уменьшением радиуса расположения магнитов (от 0,1 до 0,06 метра) и соответствующим уменьшением тангенциального зазора между магнитами (с 0,013-0,016 до 0,004-0,002 метра) при сохраняющемся левитирующем зазоре 0,013 метра. (*Выводы*) Максимальная удельная грузоподъемность платформы с учетом собственной массы подвижной части платформы (26,8 + 8 ньютонов), отнесенная к установленной массе 48 магнитов (48 × 0,0074 = 0,355 килограмма) составила 98 ньютонов на килограмм, что близко к расчетным значениям (84 ньютона на килограмм).

Ключевые слова: доильная платформа карусельного типа, модель, магнитная левитация, воздушный левитационный зазор, постоянные магниты, грузоподъемность платформы.

■ **Для цитирования:** Кирсанов В.В., Иванов Ю.А., Кирсанов С.В., Рузин С.С. Экспериментальные исследования левитирующей модели доильной платформы карусельного типа // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2025. Т. 19. N4. 13-20. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-4-13-20. EDN: YEIBXY.

Scientific article

Experimental Study of a Levitating Carousel-Type Milking Platform

Vladimir V. Kirsanov,
Dr.Sc.(Eng.), professor, corresponding member
of the Russian Academy of Sciences,
e-mail: kirvv2014@mail.ru;

Yuri A. Ivanov,
Dr.Sc.(Agri.), chief researcher,
member of the Russian Academy of Sciences,
e-mail: ros-plem@mail.ru;

Sergey V. Kirsanov,
Ph.D. student (Agri.),
e-mail: kirseryii@mail.ru;

Semyon S. Ruzin,
Ph.D.(Eng.), senior researcher,
e-mail: ruzin.s.s@yandex.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. Previous studies have highlighted the potential of magnetic suspension technology for developing a levitating carousel-type milking platform based on permanent magnets and conducting its experimental evaluation. (*Research purpose*) This study aims to perform experimental investigations and magnetostatic calculations of a levitating “Carousel” milking platform using axially magnetized permanent magnets of rectangular shape, in accordance with the proposed technological schemes. (*Materials and methods*) Three configurations for placing axially magnetized neodymium permanent magnets with a cubic shape (0.01×0.01×0.01 meters) were examined for the rotating movable and stationary components of the carousel. A methodology was developed to determine the levitation and lateral air gaps between the movable and fixed magnets under both no-load and loaded conditions. (*Results and discussion*) An experimental scale model (1:33) of a levitating carousel-type milking platform with 24 positions was developed and tested. The most effective configuration was identified as the one in which magnets were placed directly opposite each other, with like poles facing each other and a tangential air gap of 0.004–0.002 meters. The magnets were positioned along concentric circles of equal radius on the movable and stationary parts of the platform. The levitation gap between the magnets was found to be inversely proportional to the applied load, which increased from 9 to 26.8 newtons as the radius of magnet placement decreased (from 0.1 to 0.06 meters) and the tangential gap narrowed (from 0.013–0.016 to 0.004–0.002 meters), while the levitation gap remained constant at 0.013 meters. (*Conclusions*) The maximum specific load-bearing capacity of the platform, taking into account the weight of the movable part (26.8 + 8 newtons), relative to the total mass of the 48 magnets (48 × 0.0074 = 0.355 kilograms), reached 98 newtons per kilogram. The value is close to the theoretical estimate of 84 newtons per kilogram, confirming the efficiency of the proposed magnetic suspension configuration.

Keywords: carousel-type milking platform, model, magnetic levitation, air levitation gap, permanent magnets, platform load-bearing capacity.

■ **For citation:** Kirsanov V.V., Ivanov Yu.A., Kirsanov S.V., Ruzin S.S. Experimental study of a levitating carousel-type milking platform. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N4. 13-20 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-4-13-20. EDN: YEIBXY.

Крупные молочные фермы агрохолдингов с поголовьем более 1200 коров чаще всего используют доильные установки карусельного типа [1] вместимостью от 36 до 100 доильных мест, обладающие высокой пропускной способностью от 120 до 500 гол/ч за счет постоянного потока животных, рациональной рабочей позы оператора с малой зоной обслуживания [2]. Вместе с тем в процессе эксплуатации могут возникать определенные сложности, связанные с техническим обслуживанием и ремонтом колесных движителей (рельс-колесо) и ведущих колес фрикционных передач электроприводов доильной платформы и др. [3].

Альтернативным вариантом колесным движителям доильной платформы установки «Карусель» может быть ее магнитный подвес на постоянных магнитах. Были проанализированы перспективные способы применения на транспорте магнитной левитации и предложено создание левитирующей доильной платформы карусельного типа на постоянных магнитах. Это позволит исключить саму систему движителей рельс-колесо, снизить шум при движении, уменьшить затраты электроэнергии, материалоемкость, трудоемкость монтажа, технического обслуживания и существенно повысить срок службы доильной платформы (Патент RU 2743104 «Устройство магнитной левитации на постоянных магнитах», 2021).

Ранее была разработана технологическая схема, проведен ее магнитостатический расчет и осуществлено моделирование взаимодействия магнитных

сборок [5]. Для дальнейших исследований необходимо разработать, изготовить и провести испытания действующей модели левитирующей доильной платформы карусельного типа на постоянных магнитах с использованием опыта создания подобных технологий на транспорте [4].

Цель исследования. Провести экспериментальные исследования левитирующей модели доильной платформы «Карусель» на постоянных магнитах.

Методы и материалы. При создании экспериментальной модели за основу была взята технологическая схема платформы «Карусель» [1] с использованием аксиально намагниченных постоянных магнитов кубической формы. Рассматривалось несколько вариантов расположения постоянных магнитов с учетом рекомендаций [6].

В варианте 1 (рис. 1) постоянные магниты 3 и 4 диагонально расположены одноименными полюсами навстречу под углом 90° с образованием левитирующего зазора h и бокового стабилизирующего зазора s в соответствии с рекомендациями [7, 8]. Векторы намагниченности показаны стрелками на магнитах. Магниты взаимодействуют друг с другом с образованием сил левитации и дополнительной боковой стабилизации вращающейся подвижной части 1 доильной платформы относительно оси вращения (показана пунктирной линией) на основе расчетов (Веретимус Д.К., Веретимус Н.К. Основы электростатики и магнитостатики. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021. 170 с.) и представленных в работе [9].

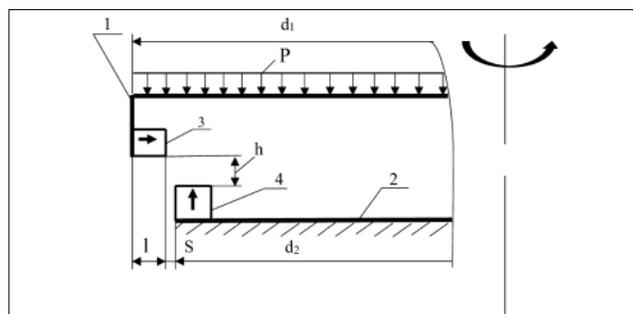


Рис. 1. Технологическая схема магнитного подвеса левитирующей модели доильной платформы карусельного типа (вариант 1): 1 – подвижная часть; 2 – неподвижная часть; 3 – боковые подвижные постоянные магниты; 4 – горизонтальные нижние неподвижные постоянные магниты; h – воздушный левитационный зазор, м; s – воздушный боковой зазор, м; l – размеры магнита, м

Fig. 1. Technological diagram of the magnetic suspension of a levitating carousel-type milking platform model (option 1): 1 – movable part; 2 – stationary part; 3 – lateral movable permanent magnets; 4 – lower horizontal fixed permanent magnets; h – air levitation gap, m; s – lateral air gap, m; l – magnet dimensions, m.

Боковой зазор определялся по формуле:

$$S = d_1 - l - d_2, \quad (1)$$

где s – воздушный боковой зазор, м; d_1 – диаметр подвижной части платформы, м; l – размеры магнита кубической формы, м; d_2 – диаметр неподвижной части платформы, м.

Воздушный левитационный зазор (h) измерялся линейкой в зависимости от нагрузки.

В варианте 2 (схема подвеса на рис. 2а) добавлен верхний ряд магнитов 5 для увеличения левитирующих сил отталкивания между магнитами 3, 4 и 5. Под нагрузкой изменяются левитационные воздушные зазоры h и h_2 за счет оседания подвижной части платформы 1, зазор h_1 – постоянный и конструктивно задан взаимным расположением магнитов 3 и 5. Боковой воздушный зазор s оставался прежним.

Воздушные левитационные зазоры на холостом ходу h_x и под нагрузкой h_p вычислялись в соответствии с рисунком 2а по выражениям:

$$\begin{cases} h_x = h_1 + l + h_{2x} \\ h_p = h_1 + l + h_{2p}. \end{cases} \quad (2)$$

В варианте 3 (рис. 2б) использовались только горизонтальные магниты 4 и 5, работающие на отталкивание. Центрирование от боковых смещений производилось только центральной осью вращения в силу симметричности конструкции и отсутствия бокового смещения, которое необходимо учитывать при создании высокоскоростного железнодорожного транспорта.

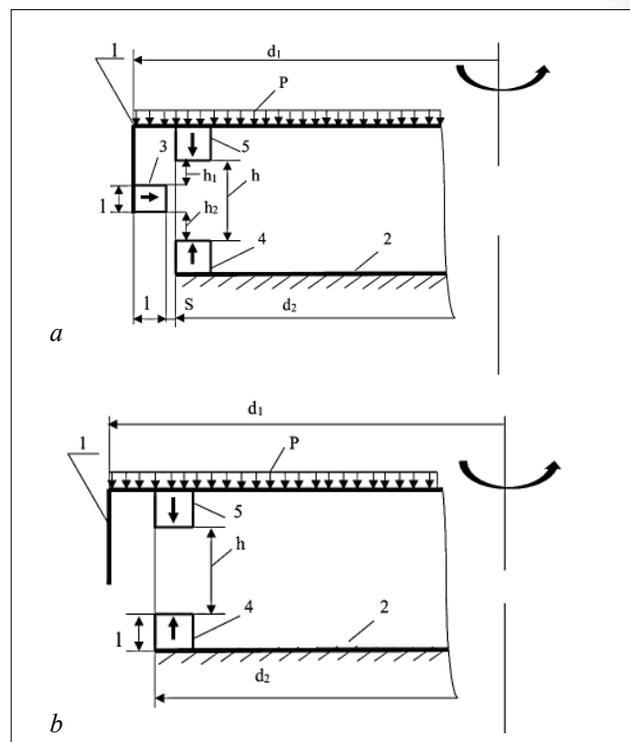


Рис. 2. Технологическая схема магнитного подвеса левитирующей модели доильной платформы карусельного типа: а – вариант 2; б – вариант 3; 1 – подвижная часть; 2 – неподвижная часть; 3 – боковые подвижные магниты (в варианте 3 отсутствуют); 4 – горизонтальные нижние неподвижные постоянные магниты; 5 – горизонтальные верхние подвижные постоянные магниты; h – воздушный левитационный зазор между нижними и верхними горизонтальными магнитами, м; h_1 – воздушный постоянный зазор между боковыми и верхними горизонтальными магнитами, м; h_2 – воздушный левитационный зазор между боковыми и нижними горизонтальными магнитами, м; s – воздушный боковой зазор между боковыми и горизонтальными магнитами, м; l – размеры магнита, м; P – распределенная нагрузка, Н

Fig. 2. Technological diagram of the magnetic suspension of a levitating carousel-type milking platform model: a – option 2; b – option 3; 1 – movable part; 2 – stationary part; 3 – lateral movable magnets; 4 – lower horizontal fixed permanent magnets; 5 – upper horizontal movable permanent magnets; h – air levitation gap between the lower and upper horizontal magnets, m; h_1 – constant air gap between the lateral and upper horizontal magnets, m; h_2 – air levitation gap between the lateral and lower horizontal magnets, m; s – lateral air gap between the lateral and horizontal magnets, m; l – magnet dimensions, m; P – distributed load, N

Все магниты в специальных держателях равномерно расположены по окружности с определенным шагом в соответствии с рекомендациями по использованию неодимовых магнитов с высокой энергией поля [11].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. На основе рассмотренных технологических схем магнитного подвеса (рисунки 1, 2) была разработана экспериментальная модель левитирующей доильной платформы «Карусель» на 24 места в масштабе 1:33 (рисунки 3-6) с учетом структуры создаваемых магнитных полей различными сборками в соответствии с рекомендациями в работах [12, 13].

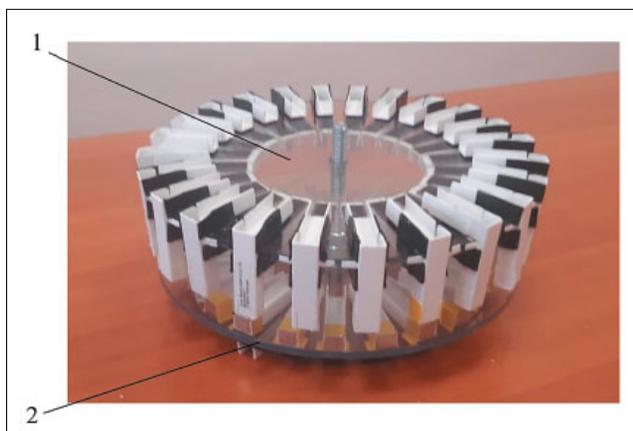


Рис. 3. Общий вид левитирующей модели доильной платформы карусельного типа: 1 – подвижная часть; 2 – неподвижная часть

Fig. 3. General view of the levitating carousel-type milking platform model: 1 – movable part; 2 – stationary part

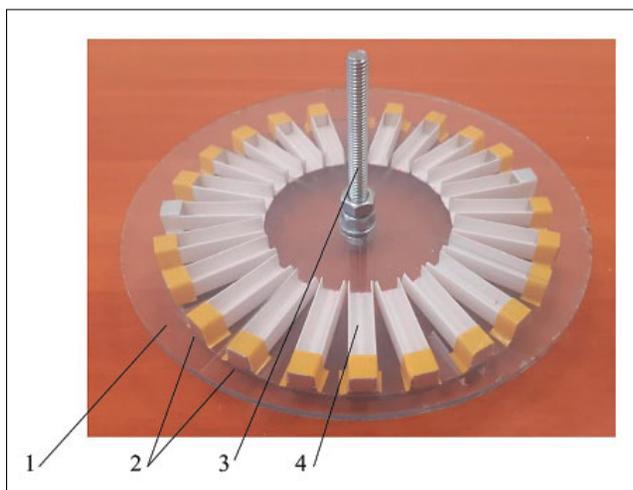


Рис. 4. Неподвижная часть левитирующей модели доильной платформы: 1 – основание; 2 – горизонтальные нижние неподвижные постоянные магниты; 3 – неподвижная ось (репер); 4 – держатели магнитов

Fig. 4. Stationary part of the levitating carousel-type milking platform model: 1 – base; 2 – lower horizontal fixed permanent magnets; 3 – fixed axis (reference point); 4 – magnet holders

Нагрузка создавалась гирьками разной массы, расположенными на подвижной части платформы (рис. 6), при этом фиксировался левитационный зазор между магнитами. Анализ данных таблицы 1 (вариант 2) показывает, что верхние магниты рас-

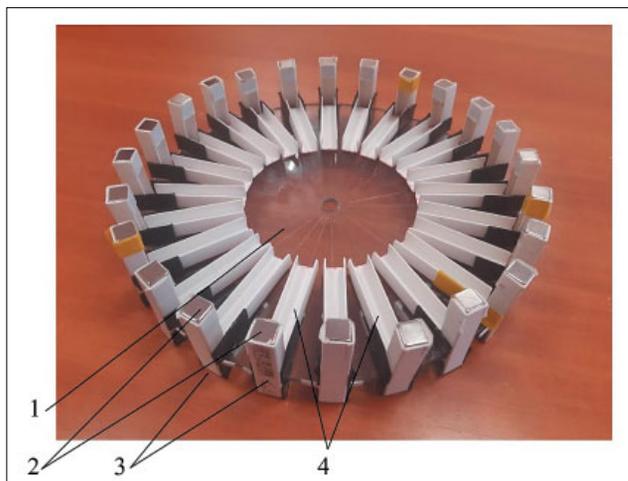


Рис. 5. Подвижная часть левитирующей модели доильной платформы карусельного типа (вид снизу): 1 – основание; 2 – боковые подвижные постоянные магниты; 3 – держатели боковых магнитов; 4 – держатели верхних горизонтальных магнитов

Fig. 5. Movable part of the levitating carousel-type milking platform model (bottom view): 1 – base; 2 – lateral movable permanent magnets; 3 – lateral magnet holders; 4 – upper horizontal magnet holders



Рис. 6. Общий вид вращающейся левитирующей модели доильной платформы карусельного типа под нагрузкой

Fig. 6. General view of the rotating levitating carousel-type milking platform model under load

положены на достаточном большом расстоянии от нижних, исходя из величины воздушного рабочего зазора $h_p = 0,041-0,033$ м, что не позволяет создать соответствующие силы отталкивания для существенного повышения грузоподъемности платформы по сравнению с первым вариантом (рис. 1). Предельные значения грузоподъемности в указанных вариантах составили 4 и 4,5 Н при левитационных зазорах 0,010 и 0,009 м соответственно. Дальнейшее увеличение нагрузки приводило к боковому опрокидыванию платформы за счет примагничивания северных полюсов подвижных боковых магнитов 2 (рис. 5) к противоположным полюсам неподвижным магнитов 2 (рис. 4) в тангенциальных зазорах между ними.

Показатель	Вариант 1	Вариант 2
Диаметр подвижной части платформы d_1 , м	0,23	0,23
Диаметр неподвижной части платформы d_2 , м	0,2	0,2
Количество постоянных магнитов: на неподвижной части на подвижной боковой части на подвижной верхней части	24 24 –	24 24 12
Направление вектора намагниченности: на неподвижной части на подвижной боковой части на подвижной верхней части	Вверх Вбок –	Вверх Вбок Вниз
Шаг расположения магнитов по окружности: на неподвижной части на подвижной боковой части на подвижной верхней части	Через 15° Через 15° –	Через 15° Через 15° Через 30°
Расстояние между магнитами по дуге окружности, м: на неподвижной части σ_{max} σ_{min} на подвижной боковой части σ_{max} σ_{min} на подвижной верхней части σ_{max} σ_{min}	0,016 0,013 0,022 0,020 – –	0,016 0,013 0,022 0,020 0,032 0,026
Характеристика постоянных неодимовых магнитов: размеры, м намагничивание остаточная магнитная индукция, Тл	0,01×0,01×0,01 Аксиальное 1,2	
Масса левитирующей подвижной части платформы с магнитами (без нагрузки), кг	0,56	0,63
Величина бокового зазора, s , м	0,08-0,1	
Величина левитирующего холостого зазора без нагрузки, м: h_x h_{2x} $h_{1-const}$	– 0,022 –	0,046 0,022 0,014
Величина левитирующего рабочего зазора с равномерно распределенной нагрузкой, h_p/h_{2p} , м: h_{p1} при нагрузке $P_1=1Н$ h_{p2} при нагрузке $P_2=2Н$ h_{p3} при нагрузке $P_3=3Н$ h_{p4} при нагрузке $P_1=3,5Н$ h_{p4} при нагрузке $P_{4max}=4Н$ h_{p5} при нагрузке $P_{5max}=4,5Н$	–/0,016 –/0,015 –/0,013 –/0,012 –/0,010 –	0,041/0,017 0,04/0,016 0,038/0,014 0,036/0,012 0,035/0,011 0,033/0,009

Учитывая данное обстоятельство, был проведен эксперимент, показывающий влияние шага расположения магнитов по дуге окружности на грузоподъемность платформы (вариант 3). Расстояние между магнитами (шаг) по дуге окружности в тангенциальном направлении регулировалось за счет изменения радиуса их расположения (от r_{min} до r_{max}) соответствующим перемещением в горизонтальных держателях 4 (рисунки 4 и 5).

Изменение радиуса расположения с 0,1 до 0,06 м привело к более плотной установке магнитов и возрастанию сил их взаимодействия, что показало необходимость усиления крепления к держателям и основанию подвижной и неподвижной частей плат-

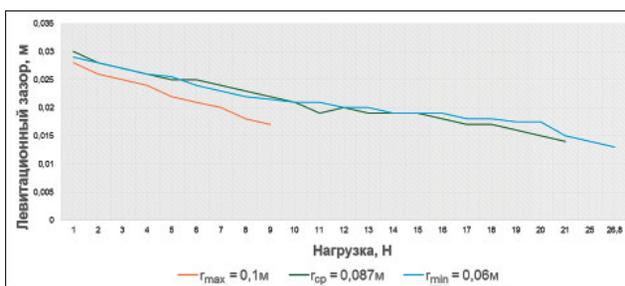


Рис. 7. Зависимости левитационных зазоров от нагрузки (по данным таблицы 2) и радиуса расположения магнитов

Fig. 7. Dependencies of levitation gaps on the load (based on Table 2 data) and magnet placement radius

показали ее работоспособность, заключающуюся в сохранении левитационных зазоров в пределах от 0,03 до 0,009 м в диапазоне нагрузок от 4 до 26,8 Н.

Наиболее предпочтительным вариантом является размещение магнитов друг над другом одноименными полюсами навстречу друг другу с тангенциальным зазором (0,004-0,002 м) на подвижной и неподвижной частях платформы на окружностях одинакового радиуса.

Левитационный зазор между магнитами обратно пропорционален грузоподъемности платформы,

которая увеличивается (от 9 до 26,8 Н) с уменьшением радиусов расположения магнитов (от 0,1 до 0,06 м) и соответствующим уменьшением тангенциальных зазоров между магнитами (от 0,013-0,016 до 0,004-0,002 м) при сохраняющемся левитационном зазоре 0,013 м.

Удельная максимальная грузоподъемность платформы с учетом собственной массы подвижной части платформы (26,8 + 8 Н), отнесенная к установленной массе 48 магнитов ($48 \times 0,0074 = 0,355$ кг) составила 98 Н/кг, что близко к расчетным значениям 84 Н/кг, представленным в работе [5].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кирсанов В.В., Федоренко В.Ф., Кирсанов С.В. Магнитостатический расчет левитирующей вращающейся доильной платформы карусель на постоянных магнитах // *Техника и оборудование для села*. 2024. №6(324). С. 29-32. DOI: 10.33267/2072-9642-2024-6-29-32
2. Морозов Н.М., Кирсанов В.В., Ценч Ю.С. Историко-аналитическая оценка развития процессов автоматизации и роботизации в молочном животноводстве // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. №1. С. 11-18. DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-1-11-18.
3. Лобачевский Я.П., Кирсанов В.В., Кирсанов С.В. Разработка новой технологической схемы доильной платформы Карусель на принципах магнитной левитации // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2024. №2. С. 63-67. DOI: 10.31857/S2500262724020128.
4. Зайцев А.А., Соколова Я.В., Пантина Т.А. Инновационное развитие транспортной системы с применением технологии магнитной левитации // *Мир транспорта*. 2019. Т. 17. №4 (83). С. 36-45. DOI: 10.30932/1992-3252-2019-17-4-36-45.
5. Лобачевский Я.П., Федоренко В.Ф., Кирсанов В.В. и др. Моделирование взаимодействия магнитных сборок левитирующей доильной платформы «карусель» // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2025. №2. С. 54-58. DOI: 10.7868/S3034582025020106.
6. Зайцев А.А. Грузовая транспортная платформа на магнитно-левитационной основе: опыт создания // *Транспортные системы и технологии*. 2015. Т. 1. №2. С. 5-15. DOI:10.17816/transsyst2015125-15.
7. Вавилов В.Е., Исмагилов Ф.Р., Жеребцов А.А. и др. Исследование магнитных полей в новой конструкции гомополярного магнитного подшипника // *Авиакосмическое приборостроение*. 2023. №8. С. 50-61. DOI: 10.25791/aviakosmos.8.2023.1357.
8. Гинзбург Б.А., Каминская Т.П., Поляков П.А., Попов В.В. Микроскопическая структура магнитного поля на поверхности постоянного магнита // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. 2018. Т. 82. №3. С. 226-231. DOI: 10.7868/S0367676518020187.
9. Ткачев А.Н., Пашковский А.В., Черноиван Д.Н. и др. Моделирование магнитного поля в нелинейных ферромагнитных средах с использованием блочных элементов и их схем замещения // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. 2020. Т. 63. №2-3. С. 44-54. DOI: 10.17213/0136-3360-2020-2-3-44-54.
10. Антонов Ю.Ф. Устройство левитации и боковой стабилизации на базе ленточного высокотемпературного сверхпроводника второго поколения // *Транспортные системы и технологии*. 2019. Т. 5. №4. С. 115-123. DOI: 10.17816/transsyst201954115-123.
11. Зайцев А.А., Соколова Я.В., Фиронов А.Н. Магнитная левитация – мировой тренд транспортных технологий // *Железнодорожный транспорт*. 2019. №3. С. 54-58. EDN: YUТОGD.
12. Гинзбург Б.А., Каминская Т.П., Поляков П.А. и др. Микроскопическая структура магнитного поля на поверхности постоянного магнита // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. 2018. Т. 82. №2. С. 226-231. DOI: 10.7868/S0367676518020187.
13. Шкаруба В.А., Брагин А.В., Волков А.А. и др. Сверхпроводящие многополюсные вигглеры для генерации синхротронного излучения в ИЯФ СО РАН // *Письма в журнал физика элементарных частиц и атомного ядра*. 2020. Т. 17. №4. С. 567-575. EDN: OCBKXSQ.

REFERENCES

1. Kirsanov V.V., Fedorenko V.F., Kirsanov S.V. Magneto-static calculation of a levitating rotating milking platform carousel on permanent magnets. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2024. №6 (324). 29-32 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2024-6-29-32.
2. Morozov N.M., Kirsanov V.V., Tsench Yu.S. Historical and analytical assessment of automation and robotization for milking processes. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023. Vol. 17. №1. 11-18 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-1-11-18.
3. Lobachevsky Ya.P., Kirsanov V.V., Kirsanov S.V. Development of a new technological scheme of the carousel milking

- platform based on the principles of magnetic levitation. *Russian Agricultural Sciences*. 2024. N2. 63-67 (In Russian). DOI: 10.31857/S2500262724020128.
4. Zaitsev A.A. Sokolova Ya.V., Pantina T.A. Innovative development of transport system using magnetic levitation technology. *World of Transport and Transportation*. 2019. Vol. 17. N4 (83). 36-45 (In Russian). DOI: 10.30932/1992-3252-2019-17-4-36-45.
 5. Kirsanov V.V. Simulation of the interaction of magnetic assemblies of the “Karusel” levitating milking platform. *Russian Agricultural Sciences*. 2025. N2. 54-58 (In Russian). DOI: 10.7868/S3034582025020106.
 6. Zaitsev A.A. Cargo-carrying transport platform based on magnetic levitation: experience of creation. *Transportation Systems and Technology*. 2015. Vol. 1. N2. 5-15 (In Russian). DOI:10.17816/transsyst2015125-15.
 7. Vavilov V.E., Ismagilov F.R., Zherebtsov A.A. et al. Investigation of magnetic fields at new construction of a homopolar magnetic bearing. *Aerospace Instrumentation*. 2023. N8. 50-61 (In Russian). DOI: 10.25791/aviakosmos.8.2023.1357.
 8. Ginzburg B.A., Kaminskaya T.P., Polyakov P.A., Popov V.V. Microscopic structure of the magnetic field on the surface of a permanent magnet. *Izvestiya of the Russian Academy of Sciences. Series Physical*. 2018. Vol. 82. N3. 226-231 (In Russian). DOI: 10.7868/S0367676518020187.
 9. Tkachev A.N., Pashkovsky A.V., Chernov D.N. et al. Modeling of a magnetic field in nonlinear ferromagnetic media using block elements and their replacement schemes. *Russian Electromechanics*. 2020. Vol. 63. N2-3. 44-54 (In Russian). DOI: 10.17213/0136-3360-2020-2-3-44-54.
 10. Antonov Yu.F. Levitation and lateral stabilization device based on a second-generation high-temperature superconductor. *Transport Systems and Technologies*. 2019. Vol. 5. N4. 115-123 (In Russian). DOI: 10.17816/transsyst201954115-123.
 11. Zaitsev A.A., Sokolova Ya.V., Fironov A.N. Magnetic levitation – a global trend in transport technologies. *Railway transport*. 2019. N3. 54-58 (In Russian). EDN: YYTOGD.
 12. Ginzburg B.A., Kaminskaya T.P., Polyakov P.A. et al. Microstructure of the magnetic field on the surface of a permanent magnet. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2018. Vol. 82. N2. 226-231 (In Russian). DOI: 10.7868/S0367676518020187.
 13. Shkaruba V.A., Bragin A.V., Volkov A.A. et al. Superconducting multipole wigglers for generating synchrotron radiation at the Budker institute of nuclear physics. *Physics of Elementary Particles and Atomic Nuclei, Letters*. 2020. Vol. 17. N4. 567-575 (In Russian). EDN: OCBKSQ.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Кирсанов В.В. – формулирование основной концепции статьи, написание введения, методической части и выводов;
 Иванов Ю.А. – участие в обосновании и написании методической части статьи и выводов;
 Кирсанов С.В. – разработка эскизных проектов левитирующей модели карусели, подготовка графических и табличных материалов, обработка экспериментальных данных;
 Рuzин С.С. – участие в написании текста статьи, подборе и анализе литературы, изготовлении отдельных деталей для сборки левитирующей модели карусели.
 Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Kirsanov V.V. – formulating the main concept of the manuscript; authoring the introduction, methodology and conclusions sections;
 Ivanov Yu.A. – contribution to the justification and writing the methodology and conclusions sections;
 Kirsanov S.V. – developing draft designs for the levitating carousel model; preparing graphical and tabular materials; processing experimental data;
 Ruzin S.S. – participation in manuscript writing; selection and analysis of relevant literature; fabricating individual components for assembling the levitating carousel model.
 The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию
 Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on
 The paper was accepted for publication on

03.09.2025
 25.11.2025

EDN: ZWFIHW

DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-4-21-28



Научная статья

УДК: 631.171:632.915:004.93



Сравнение подходов глубокого обучения к распознаванию заболевших растений картофеля

Алексей Викторович Сибирёв,
доктор технических наук,
главный научный сотрудник,
член-корреспондент Российской академии наук,
e-mail: sibirev2011@yandex.ru;
Алексей Юрьевич Овчинников,
младший научный сотрудник,
e-mail: aleksovchinn@gmail.com;

Владимир Сергеевич Тетерин,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
e-mail: v.s.teterin@mail.ru;
Николай Сергеевич Панферов,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
e-mail: nikolaj-panfyorov@yandex.ru;
Сергей Александрович Пехнов,
старший научный сотрудник,
e-mail: pehnov@mail.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Исследования проводились в рамках гранта Российского научного фонда № 23-76-10062 «Разработка роботизированного комплекса с цифровой системой интеллектуального управления для ухода за растениями картофеля и исследованием закономерностей распространения инфекционных заболеваний в полевых условиях производства семян»

Реферат. Возможность своевременно отличать заболевшие сельскохозяйственные культуры от здоровых играет решающую роль в обеспечении продовольственной безопасности и минимизации экономических потерь. Машинное зрение в сочетании с алгоритмами глубокого обучения позволяет эффективно и точно отслеживать состояние посадок картофеля, выявляя симптомы заболеваний, что является более продуктивным подходом по сравнению с традиционными методами визуальной оценки. *(Цель исследования)* Сравнительный анализ одноэтапного и двухэтапного подходов к распознаванию заболевших и здоровых растений картофеля на основе алгоритмов глубокого обучения. *(Материалы и методы)* В исследовании использовали два подхода к процессу обучения нейронной сети с целью распознаванию заболевших и здоровых растений картофеля: одноэтапный и двухэтапный. В рамках одноэтапного подхода применялся один алгоритм глубокого обучения для одновременной классификации и локализации растений. Двухэтапный подход включал использование двух алгоритмов: первый определял границы растений, а второй классифицировал их как здоровые или заболевшие. С целью обучения алгоритмов использовались различные базы данных, включая снимки листьев и кустов картофеля. *(Результаты и обсуждение)* Проведен сравнительный анализ эффективности одноэтапного и двухэтапного подходов к распознаванию заболевших растений картофеля с использованием алгоритмов глубокого обучения. По каждому методу обучения было определено общее среднее квадратичное отклонение и среднее квадратичное отклонение для координат, построены матрицы запутанности. *(Выводы)* Двухэтапный подход продемонстрировал высокую эффективность в дифференциации больных и здоровых кустов картофеля, несмотря на небольшое снижение точности определения координат по сравнению с методом двухэтапного обучения, где использовались снимки как отдельных листьев, так и растений в целом. Данные методы имеют уникальные преимущества и могут быть интегрированы с современными технологиями для более эффективного выявления фитопатологий. **Ключевые слова:** определение заболеваний картофеля, машинное обучение, нейронные сети, машинное зрение, фитопрочистка, возделывание картофеля, определение координат растений.

■ **Для цитирования:** Сибирёв А.В., Овчинников А.Ю., Тетерин В.С., Панферов Н.С., Пехнов С.А. Сравнение подходов глубокого обучения к распознаванию заболевших растений картофеля // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2025. Т. 19. N4. С. 21-28. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-4-21-28. EDN: ZWFIHW.

Scientific article

Comparison of Deep Learning Approaches for Detecting Diseased Potato Plants

Alexey V. Sibirev,
Dr.Sc.(Eng.), chief researcher, corresponding member
of the Russian Academy of Sciences,
e-mail: sibirev2011@yandex.ru;

Alexey Yu. Ovchinnikov,
junior researcher,
e-mail: aleksovchinn@gmail.com;

Vladimir S. Teterin,

Ph.D.(Eng.), senior researcher,
e-mail: v.s.teterin@mail.ru;

Nikolay S. Panferov,

Ph.D.(Eng.), senior researcher;
e-mail: nikolaj-panfyorov@yandex.ru;

Sergey A. Pekhnov,

senior researcher,
e-mail: pehnov@mail.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. The timely identification of diseased agricultural crops is essential for maintaining food security and reducing economic losses. The integration of machine vision with deep learning algorithms offers a more efficient and accurate method for monitoring potato crops and detecting disease symptoms than conventional visual assessment techniques. (*Research purpose*) This study aims to conduct a comparative analysis of one-stage and two-stage deep learning approaches for recognizing diseased and healthy potato plants. (*Materials and methods*) Two approaches were employed to train neural networks for the identification of diseased and healthy potato plants: a one-stage and a two-stage approach. In the one-stage approach, a single deep learning algorithm was used to simultaneously perform plant classification and localization. The two-stage approach utilized two separate algorithms: the first was responsible for detecting plant boundaries, while the second classified the identified regions as healthy or diseased. The models were trained on diverse datasets comprising images of individual potato leaves as well as entire plants. (*Results and discussion*) A comparative analysis was performed to evaluate the effectiveness of the one-stage and two-stage deep learning approaches in detecting diseased potato plants. For each training method, both the overall mean squared error and the coordinate-specific mean squared error were computed. Additionally, confusion matrices were generated to assess classification performance. The analysis revealed differences in accuracy and precision between the two approaches, highlighting their respective strengths and limitations. (*Conclusions*) The two-stage approach proved to be highly effective in distinguishing between diseased and healthy potato plants. Although it exhibited a slight reduction in coordinate-prediction accuracy – particularly when trained on both individual leaf images and whole-plant images – it offered superior classification performance. Both approaches demonstrate distinct advantages and hold significant potential for integration with modern technologies aimed at enhancing the early detection of phytopathologies in agricultural crops.

Keywords: potato disease detection, machine learning, neural networks, machine vision, phytodiagnosics, potato cultivation, plant coordinate detection.

For citation: Sibirev A.V., Ovchinnikov A.Yu., Teterin V.S., Panferov N.S., Pekhnov S.A. Comparison of deep learning approaches for detecting diseased potato plants. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N4. 21-28 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-4-21-28. EDN: ZWFIHW.

Своевременное выявление заболевших сельскохозяйственных растений особенно актуально в отношении картофеля — одной из важнейших продовольственных культур в России [1, 2]. Машинное зрение относится к ключевым технологиям в области искусственного интеллекта и является мощным инструментом распознавания и анализа изображения [3, 4].

В сельском хозяйстве применение машинного зрения для мониторинга состояния посадок, анализа урожайности и выявления вредителей позволяет оптимизировать агротехнические процессы и повысить урожайность [5-7]. В сочетании с алгоритмами глубокого обучения технологии машинного зрения трансформируют традиционные методы мониторинга посадок, обеспечивая точность и скорость [8, 9]. Анализ цветочных паттернов, текстурных особенностей и морфологических изменений растений методами машинного зрения позволяет выявлять симптомы различных заболеваний.

Развитие и внедрение машинного зрения способствуют повышению эффективности и точности

различных процессов, открывают новые возможности для научных исследований и практических приложений [10-12]. Особенно перспективны в этой области нейросетевые архитектуры, способные к автоматическому извлечению из изображений диагностически значимых признаков [7, 13, 14].

Разработка системы определения заболевших и здоровых растений картофеля с использованием глубокого обучения составляет важную задачу, как альтернатива трудоемким и менее эффективным традиционным методам при работе с большими объемами данных [15-17].

Цель исследования — провести сравнительный анализ одноэтапного и двухэтапного подходов к распознаванию заболевших и здоровых растений картофеля на основе алгоритмов глубокого обучения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Методологический базис исследования предполагает дифференциацию двух принципиально разных подходов к решению поставленной задачи: одноэтапного и двухэтапного.

Одноэтапный подход (метод 1) к распознаванию заболевших и здоровых растений картофеля заклю-

чается в одновременной их классификации и локализации [18]. В этом случае используется один алгоритм глубокого обучения для выделения растения в рамки и присвоения ему соответствующей метки класса (заболевшее/здоровое).

При двухэтапном подходе используются два алгоритма глубокого обучения для разных целей. Первый алгоритм обучается только для выделения растений на изображении и определения их границы, а второй алгоритм обучается с целью классификации растений к группе заболевших или здоровых на основе анализа имеющихся признаков. Из-за особенностей типа данных, с которыми работает алгоритм, происходит повторное выделение объекта в рамки на втором этапе. В качестве алгоритмов глубокого обучения использовалась нейронная сеть YOLOv11 [19].

При реализации двухэтапного подхода использовались различные методы обучения с целью классификации растений. Первый из этих методов (метод 2.1) заключался в обучении с использованием базы данных, состоящей из снимков отдельных здоровых и заболевших листьев картофеля. Во втором методе (метод 2.2) использовалась база данных из снимков заболевших и здоровых кустов. Третий вариант (метод 2.3) предусматривал использование комбинированной базы данных из снимков здоровых и зараженных листьев и растений картофеля.

Результаты и обсуждение. Для сравнительного анализа эффективности применения одно- и двухэтапных подходов к распознаванию заболевших растений картофеля с помощью алгоритмов глубокого обучения была подготовлена тестовая выборка из 40 изображений кустов картофеля, на которых алгоритм не проходил обучение и валидацию.

На *рисунке 1* показана работа алгоритма глубокого обучения при использовании одноэтапного подхода, т.е. выделение области растения картофеля и классификация его как заболевшее или здоровое (в этом примере растение классифицировано как здоровое).

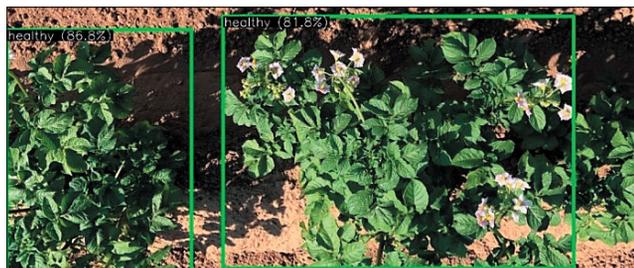


Рис. 1. Пример работы одноэтапного подхода к распознаванию заболевших и здоровых растений картофеля на основе алгоритма глубокого обучения (метод 1)

Fig. 1. Example of a one-step approach to detecting diseased and healthy potato plants using a deep learning algorithm (method 1)

Применение двухэтапного подхода к диагностике заболеваний картофеля, где второй алгоритм был обучен на основе анализа листьев растений (метод 2.1) представлен на *рисунке 2*. Основная идея состоит в возможности фокусировки на микроструктурных особенностях растения, в частности, листьев. Использование в процессе обучения базы данных из изображений отдельных здоровых и пораженных листьев обеспечило алгоритму возможность детального изучения различных паттернов повреждений и аномалий на уровне отдельных органов растения.

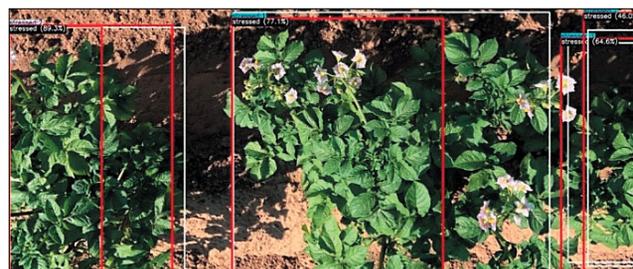


Рис. 2. Пример работы двухэтапного подхода к распознаванию заболевших и здоровых растений картофеля на основе алгоритма глубокого обучения (метод 2.1)

Fig. 2. Example of a two-step approach to detecting diseased and healthy potato plants using a deep learning algorithm (method 2.1)

При анализе полученных изображений можно заметить, что классификатор выделяет только часть куста как зараженное растение, в то время как область, используемая алгоритмом для определения координат всего растения, оказывается больше.

Использование двухэтапного подхода, в котором второй алгоритм был обучен с использованием изображений здоровых и зараженных кустов картофеля (метод 2.2), представлено на *рисунке 3*.



Рис. 3. Пример работы двухэтапного подхода к распознаванию заболевших и здоровых растений картофеля с обучением на втором этапе на кустах (метод 2.2)

Fig. 3. Example of a two-stage approach for detecting diseased and healthy potato plants, with the second stage learning on entire bushes (method 2.2)

Главная идея основана на восприятии состояния растения в целом, принимая во внимание взаимодействие между различными частями на снимках

заболевших и здоровых кустов. Это позволило алгоритму учитывать контекстуальные факторы и выявлять заболевания на системном уровне, охватывая весь организм растения.

Комбинированный подход при двухэтапном методе (второй алгоритм обучен на основе изображений здоровых и зараженных листьев и растений картофеля, метод 2.3) иллюстрирован на рисунке 4. Основная идея основана на создании возможности алгоритму учитывать как локальные признаки заболеваний листьев, так и особенности всего куста.

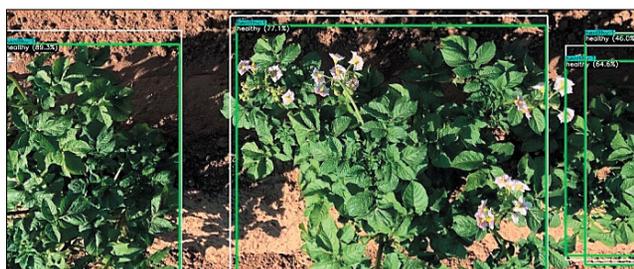


Рис. 4. Пример двухэтапного подхода к распознаванию заболевших и здоровых растений картофеля с обучением на втором этапе на отдельных листьях и кустах (метод 2.3)

Fig. 4. Example of a two-stage approach for detecting diseased and healthy potato plants, with the second stage learning on individual leaves and whole bushes (method 2.3)

Важно отметить, что если в рамках одной белой области (которая появляется вследствие работы первого этапа) выделяется несколько предсказаний, то выбирается область их перекрытия (если ее площадь больше 60%).

Для оценки корректности определения координат центра распознанных растений картофеля для каждого из подходов использовали среднее квадратическое отклонение (СКО) вычисленных координат центра объекта от эталонных координат (определенных человеком визуально) $X_{п}$, $Y_{п}$ и $X_{эт}$, $Y_{эт}$ – предсказанные и эталонные координаты центра растения картофеля на изображении, pix :

$$\begin{cases} \sigma_X = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{п} - X_{эт})^2}{n}} \\ \sigma_Y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{п} - Y_{эт})^2}{n}} \end{cases} \quad (1)$$

где σ_X , σ_Y – среднее квадратическое отклонение для координаты X и Y соответственно; $X_{п}$, $Y_{п}$ – предсказанные координаты центра растения картофеля на изображении, pix ; $X_{эт}$, $Y_{эт}$ – эталонные координаты центра растения картофеля на изображении, pix ; n – количество проанализированных изображений

Также оценивалось комбинированное среднее квадратическое отклонение на основе евклидова расстояния, т.е. метрика, объединяющая ошибки по обе-

им координатам (X и Y) в единый показатель точности определения положения точки:

$$\sigma_{общ} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\sqrt{(X_{п} - X_{эт})^2 + (Y_{п} - Y_{эт})^2})^2}{n}} \quad (2)$$

$\sigma_{общ}$ – общее среднее квадратическое отклонение.

С использованием полученных данных в программе *Excel* был построен график, характеризующий изменение среднее квадратического отклонения вычисленных координат от эталонных для каждого из предложенных подходов (рис. 5). Анализ этой зависимости показал, что двухэтапный подход к обучению с использованием базы данных, включающей изображения заболевших и здоровых растений картофеля (методы 2.2 и 2.3), дает лучший результат с точки зрения точности определения центра координат выделенного растения картофеля, так как СКО, т.е. ошибка, у этих методов оказалась наименьшей как по отдельным координатам, так и по комбинированному показателю.

Кроме точности определения координат, оценивалась корректность распределения растений к одному из классов (заболевшее или здоровое) с использованием такого общепринятого показателя, как матрица запутанности. Матрица запутанности представляет собой таблицу, по которой видно, насколько хорошо работает классификационная модель, определяющая принадлежность выделенного объекта к соответствующему классу, при сравнении ее предсказаний с истинными ответами [20].

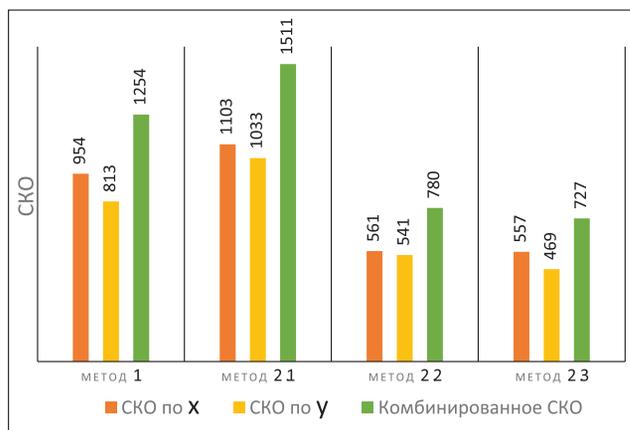


Рис. 5. Среднее квадратическое отклонение вычисленных координат от эталонных для каждого метода

Fig. 5. Root mean square deviation of the calculated coordinates from the reference values for each method

Для каждого класса выявляется количество образцов, которые были правильно или неправильно классифицированы. Таким образом формируется комплексное представление о производительности модели с выделением как точных прогнозов, так и областей, где происходит неправильная классификация.

$$C = \begin{bmatrix} TN & FP \\ FN & TP \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где TN – количество истинно отрицательных результатов для класса i , этот квадрант в матрице означает количество корректно классифицированных алгоритмом растений, принадлежащих к классу «0» (здоровое); FP – количество ложноположительных результатов для класса i , этот квадрат означает ошибку классификации, т.е. растения, принадлежащие к классу «0», были отнесены алгоритмом к классу «1» (заболевшее); FN – количество ложноотрицательных результатов для класса i , этот квадрант также означает ошибку классификации, когда растения, которые принадлежат к классу «1» (заболевшее) были отнесены алгоритмом к классу «0» (здоровое); TP – количество истинно положительных результатов для класса i , этот квадрант означает количество корректно классифицированных алгоритмом растений, принадлежащих к классу «1» (заболевшее).

Необходимо отметить, что на одном изображении может присутствовать больше одного куста картофеля, поэтому матрица запутанности содержит более 40 случаев классификации кустов картофеля.

Матрица запутанности для одноэтапного подхода к обучению представлена на *рисунке 6*. Анализ ее показал, что были определены 67 растений картофеля, при этом 16 растений были ошибочно отнесены к заболевшим.



Рис. 6. Матрица запутанности одноэтапного подхода к распознаванию заболевших и здоровых растений картофеля (метод 1)

Fig. 6. Confusion matrix of the one-step approach for detecting diseased and healthy potato plants (method 1)

Матрица запутанности для двухэтапного подхода к диагностике заболеваний картофеля, где второй алгоритм был обучен на основе анализа листьев растений (метод 2.1), представлена на *рисунке 7*.

Основная часть растений на тестовых изображениях, прошедших классификацию с использованием подхода к обучению на базе данных, содер-

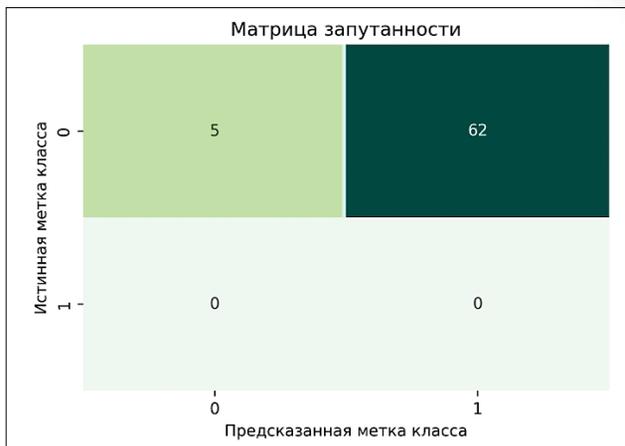


Рис. 7. Матрица запутанности двухэтапного подхода к распознаванию заболевших и здоровых растений картофеля с обучением на втором этапе на отдельных листьях (метод 2.1)

Fig. 7. Confusion matrix of the two-stage approach for detecting diseased and healthy potato plants, with second-stage learning on individual leaves (method 2.1)

жащих только отдельные листья картофеля, была ошибочно распознана как заболевшие. Из 67 проанализированных растений 62 были классифицированы неверно, что указывает на ограниченность текущего подхода к обучению и его недостаточную обобщающую способность.

Матрица запутанности для двухэтапного подхода, в котором второй алгоритм был обучен с использованием изображений здоровых и зараженных кустов картофеля (метод 2.2), представлена на *рисунке 8*.

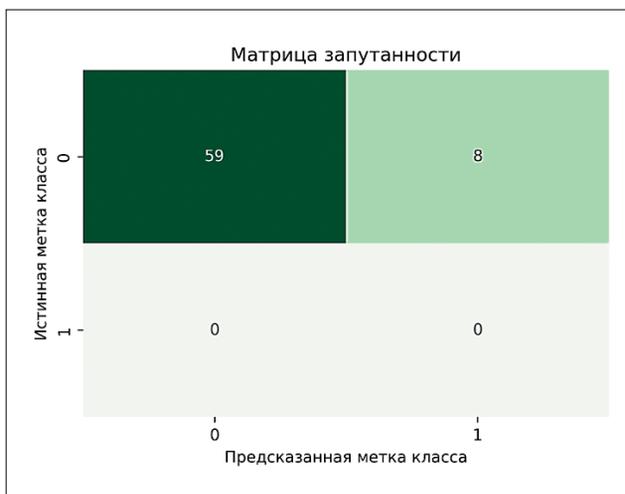


Рис. 8. Матрица запутанности двухэтапного подхода к распознаванию заболевших и здоровых растений картофеля с обучением на втором этапе на кустах картофеля (метод 2.2)

Fig. 8. Confusion matrix of the two-stage approach for detecting diseased and healthy potato plants, with second-stage learning on potato bushes (method 2.2)

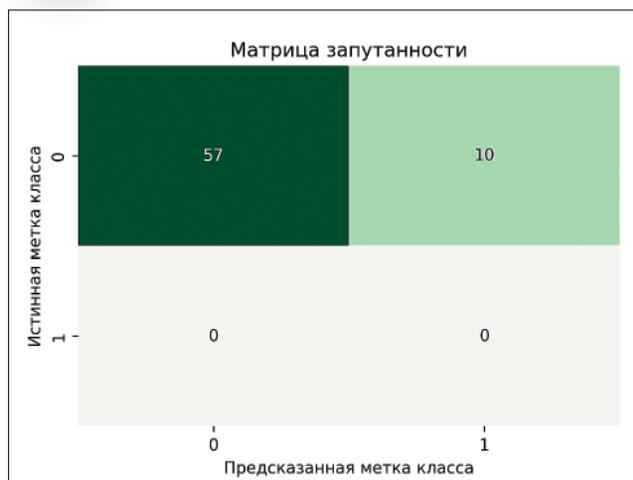


Рис. 9. Матрица запутанности двухэтапного подхода к распознаванию заболевших и здоровых растений картофеля с обучением на втором этапе на отдельных листьях картофеля и кустах (метод 2.3)

Fig. 9. Confusion matrix of the two-stage approach for detecting diseased and healthy potato plants, with second-stage learning on individual potato leaves and bushes (method 2.3)

Матрица запутанности для двухэтапного подхода, где второй алгоритм был обучен на основе изображений здоровых и зараженных листьев и растений картофеля (метод 2.3), представлен на рисунке 9.

Анализ матриц запутанности для методов 2.2 и 2.3 показал, что корректность распознавания значительно выше, чем при использовании в процессе обучения базы данных с изображением только отдельных зараженных и здоровых листьев картофеля, а также в сравнении с одноэтапным подходом с изображениями растений картофеля. Согласно полученным результатам в методе 2.2 было ошибочно распознано 8 растений, а в методе 2.3 – 10 растений.

Полученные результаты подтверждают, что использование более разнообразных данных на вто-

ром этапе обучения значительно повышает способность модели к точной классификации. Включение изображений здоровых и зараженных кустов, а также листьев позволяет модели лучше обобщать и различать здоровые и больные растения.

Таким образом, двухэтапный подход с использованием более репрезентативных данных на втором этапе обучения демонстрирует более высокую эффективность и надежность в классификации растений по сравнению с одноэтапным и двухэтапным подходами, использующими ограниченные данные.

Выводы. Исходя из полученных результатов, можно заключить, что двухэтапный подход, включающий обучение на втором этапе с использованием заболевших и здоровых растений картофеля (метод 2.2), демонстрирует высокую эффективность в решении задачи дифференциации больных и здоровых растений. Несмотря на незначительное снижение точности определения координат по сравнению с методом 2.3, метод 2.2 демонстрирует превосходство в классификации состояния растений.

Интеграция высокой точности локализации растений с высокой точностью классификации их состояния делает метод 2.2 наиболее перспективным для своевременного выявления заболеваний и предотвращения их распространения в сельскохозяйственной отрасли. При этом метод 2.3 также заслуживает внимания. Расширение обучающей выборки потенциально позволит обеспечить дальнейшее повышение точности классификации обоих методов.

Таким образом, можно отметить, что оба метода обладают уникальными преимуществами, а их интеграция с современными технологиями, включая дистанционное зондирование и генетические маркеры, открывает новые горизонты в области выявления фитопатологий, позволяя более эффективно управлять ресурсами и повышать урожайность сельскохозяйственных культур.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Борычев С.Н., Владимиров А.Ф., Колошеин Д.В. и др. К вопросу об исследованиях по хранению картофеля // *Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева*. 2019. N2(42). С. 129-134. EDN: НУКQNU.
- Тарханова З.Э. Продовольственная безопасность государства: содержание, значение, угрозы, продовольственной безопасности // *Экономика и управление: проблемы, решения*. 2024. Т. 6. N10(151). С. 84-90. DOI: 10.36871/ek.up.p.r.2024.10.06.010.
- Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Дорохов А.С. и др. Современные технологии и техника для сельского хозяйства – тенденции выставки AGRITECHNIKA 2019 // *Тракторы и сельхозмашины*. 2020. N6. С. 28-40. DOI: 10.31992/0321-4443-2020-6-28-40.
- Дорохов А.С., Сибирев А.В., Пономарев А.Г., Сазонов Н.В. Аналитическое обоснование технологического процесса работы машины для удаления зараженных растений картофеля и овощных культур // *Аграрный научный журнал*. 2024. N5. С. 130-136. DOI: 10.28983/asj.y2024i5pp130-136.
- Лобачевский Я.П., Ценч Ю.С. Принципы формирования систем машин и технологий для комплексной механизации и автоматизации технологических процессов в растениеводстве // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. N4. С. 4-12. DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-4-4-12.
- Алферьев Д.А. Практика реализации сверточных нейронных сетей в сельском хозяйстве и агропромышленном комплексе // *АгроЗооТехника*. 2020. Т. 3. N2.

- С. 4. DOI: 10.15838/alt.2020.3.2.4.
7. Аксенов А.Г., Тетерин В.С., Овчинников А.Ю. и др. Использование нейронной сети для выявления больных растений картофеля // *Аграрная наука*. 2022. N7-8. С. 167-171. DOI: 10.32634/0869-8155-2022-361-7-8-167-171.
 8. Ценч Ю.С., Годлевская Е.В. Математическое моделирование как инструмент проектирования сельскохозяйственных машин и агрегатов (применительно к истории развития научной школы Южного Урала) // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. N2. С. 4-12. DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-2-4-12.
 9. Каличкин В.К. О необходимости трансформации парадигмы научных исследований по земледелию (сообщение второе) // *Сибирский вестник сельскохозяйственной науки*. 2024. Т. 54. N9(310). С. 102-115. DOI: 10.26898/0370-8799-2024-9-11.
 10. Arshaghi A., Ashourian M., Ghabeli L. Potato diseases detection and classification using deep learning methods. *Multimed Tools Appl*. 2023. 82. 5725-5742. DOI: 10.1007/s11042-022-13390-1.
 11. Fuentes A., Yoon S., Kim S.C., Park D.S. A deep robust-learning-based detector for real-time tomato plant diseases and pests recognition. *Sensors*. 2017. Vol. 17. N9. 2022. DOI: 10.3390/s17092022.
 12. Barbedo J.G.A. Factors influencing the use of deep learning for plant disease recognition. *Biosystems Engineering*. 2018. Vol. 172. 84-91. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2018.05.013.
 13. Старовойтов С.И., Коротченя В.М. Концепция цифровизации почвообрабатывающих машин // *Техника и оборудование для села*. 2021. N8(290). С. 2-6. DOI: 10.33267/2072-9642-2021-8-2-6.
 14. Лобачевский Я.П., Лачуга Ю.Ф., Измайлов А.Ю., Шогенов Ю.Х. Научно-технические достижения агроинженерных научных организаций в условиях цифровой трансформации сельского хозяйства // *Техника и оборудование для села*. 2023. N4(310). С. 2-5. DOI: 10.33267/2072-9642-2023-4-2-5.
 15. Ивашова О.Н., Гавриловская Н.В., Щедрина Е.В. Внедрение цифровых технологий для обеспечения развития сельскохозяйственной отрасли // *Международный журнал гуманитарных и естественных наук*. 2022. N3-2(66). С. 137-139. DOI: 10.24412/2500-1000-2022-3-2-137-139.
 16. Деревянных Е.А., Митрофанова Т.В., Сорокин С.С. и др. О применении искусственного интеллекта в сельском хозяйстве // *Вестник Чувашского государственного аграрного университета*. 2023. N4(27). С. 182-187. DOI: 10.48612/vchd2ut-5bhh-4dkk.
 17. Овчинников А.Ю., Тетерин В.С., Панферов Н.С., Пехнов С.А. Разработка системы оценки трехмерного положения зараженного растения картофеля // *Аграрный научный журнал*. 2025. N3. С. 136-142. DOI: 10.28983/asj.2025i3pp136-142.
 18. Amit Y., Felzenszwalb P., Girshick R. Object detection. *Computer vision: A reference guide. Springer International Publishing*. 875-883. DOI: 10.1007/978-3-030-63416-2.
 19. Khanam R., Hussain M. YOLOv11: An overview of the key architectural enhancements. *arXiv preprint arXiv*. 2410.17725. 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2410.17725.
 20. Jafar A., Bibi N., Naqvi R.A. et al. Revolutionizing agriculture with artificial intelligence: plant disease detection methods, applications, and their limitations. *Frontiers in Plant Science*. 2024. Vol. 15. 1356260. DOI: 10.3389/fpls.2024.1356260.

REFERENCES

1. Borychev S.N., Vladimirov A.F., Koloshein D.V. et al. To the question of research on storing potatoes. *Bulletin of the Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev*. 2019. N2(42). 129-134 (In Russian). EDN: HIKKNU.
2. Tarkhanova Z.E. Food security of the state: content, significance, threats, food security. *Economics and Management: Problems, Solutions*. 2024. Vol. 6. N10(151). 84-90 (In Russian). DOI: 10.36871/ek.up.p.r.2024.10.06.010.
3. Izmaylov A.Yu., Lobachevskiy Ya.P., Dorokhov A.S. et al. Modern agriculture technologies and equipment – trends of an agritechnika 2019 exhibition. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2020. N6. 28-40 (In Russian). DOI: 10.31992/0321-4443-2020-6-28-40.
4. Dorokhov A.S., Sibirev A.V., Ponomarev A.G., Sazonov N.V. Analytical justification of the technological process of the machine for removing infected potato and vegetable crops. *Agrarian Scientific Journal*. 2024. N5. 130-136 (In Russian). DOI: 10.28983/asj.2024i5pp130-136.
5. Lobachevsky Ya.P., Tsench Yu.S. Principles of forming machine and technology systems for integrated mechanization and automation of technological processes in crop production. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2022. Vol. 16. N4. 4-12 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-4-4-12.
6. Alferyev D.A. Practice of implementing convolutional neural networks in agriculture and agro-industrial complex. *Agricultural and Livestock Technology*. 2020. Vol. 3. N2. 4 (In Russian). DOI: 10.15838/alt.2020.3.2.4.
7. Aksenov A.G., Teterin V.S., Ovchinnikov A.Yu. et al. Using a neural network to identify diseased potato plants. *Agrarian Science*. 2022. N7-8. 167-171 (In Russian). DOI: 10.32634/0869-8155-2022-361-7-8-167-171.
8. Tsench Yu.S., Godlevskaya E.V. Mathematical modeling as a aspect for designing agricultural machines and units (development history of Southern Urals scientific school). *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023. Vol. 17. N2. 4-12 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-2-4-12.
9. Kalichkin V.K. On the need for a paradigm shift in agricultural research (message two). *Siberian Herald of Agricultural Science*. 2024. Vol. 54. N9(310). 102-115 (In Russian).

- Russian). DOI: 10.26898/0370-8799-2024-9-11.
10. Arshaghi A., Ashourian M., Ghabeli L. Potato diseases detection and classification using deep learning methods. *Multimed Tools Appl.* 2023. 82. 5725-5742 (In English). DOI: 10.1007/s11042-022-13390-1.
 11. Fuentes A., Yoon S., Kim S.C., Park D.S. A deep robust-learning-based detector for real-time tomato plant diseases and pests recognition. *Sensors.* 2017. Vol. 17. N9. 2022 (In English). DOI: 10.3390/s17092022.
 12. Barbedo J.G.A. Factors influencing the use of deep learning for recognition of plant diseases. *Biosystems Engineering.* 2018. Vol. 172. 84-91 (In English). DOI: 10.1016/J.BIOSYSTEMSENG.2018.05.013.
 13. Starovoitov S.I., Korotchenya V.M. A concept of digitalization of tillage machines. *Machinery and Equipment for Rural Area.* 2021. N8(290). 2-6 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2021-8-2-6.
 14. Lobachevskiy Ya.P., Lachuga Yu.F., Izmaylov A.Yu., Shogenov Yu.Kh. Scientific and technical achievements of agricultural engineering organizations in the context of digital transformation of agriculture. *Machinery and Equipment for Rural Areas.* 2023. N4(310). 2-5 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2023-4-2-5.
 15. Ivashova O.N., Gavrilovskaya N.V., Shchedrina E.V. Introduction of digital technologies to ensure the development of the agricultural industry. *International Journal of Humanities and Natural Sciences.* 2022. N3-2(66). 137-139 (In Russian). DOI: 10.24412/2500-1000-2022-3-2-137-139.
 16. Derevyannykh E.A., Mitrofanova T.V., Sorokin S.S. et al. On the application of artificial intelligence in agriculture. *Vestnik Chuvash State Agrarian University.* 2023. N4(27). 182-187 (In Russian). DOI: 10.48612/vchd2ut-5bhh-4dkk.
 17. Ovchinnikov A.Yu., Teterin V.S., Panferov N.S., Pekhnov S.A. Development of a system for assessing the three-dimensional position of an infected potato plant. *Agrarian Scientific Journal.* 2025. N3. 136-142 (In Russian). DOI: 10.28983/asj.y2025i3pp136-142.
 18. Amit Yu., Felzenshvalb P., Girshik R. Object detection. Computer vision: a reference guide. *Springer International Publishing.* 2021. 875-883 (In English). DOI: 10.1007/978-3-030-63416-2.
 19. Khanam R., Hussain M. YOLOv11: An overview of the key architectural enhancements. *arXiv preprint arXiv.* 2410.17725.2024 (In English). DOI: 10.48550/arXiv.2410.17725.
 20. Jafar A., Bibi N., Naqvi R.A. et al. Revolutionizing agriculture with artificial intelligence: plant disease detection methods, applications, and their limitations. *Frontiers in Plant Science.* 2024. Vol. 15. 1356260 (In English). DOI: 10.3389/fpls.2024.1356260.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Сибирёв А.В. – общее руководство, постановка задач исследования, научное редактирование текста статьи; Овчинников А.Ю. – подготовка текста, сбор материалов, анализ литературных данных, формирование выводов; Тетерин В.С. – редактирование и доработка текста, анализ литературных данных, формирование выводов; Панферов Н.С. – сбор материалов, доработка текста, анализ литературных данных; Пехнов С.А. – сбор материалов, подготовка текста, анализ литературных данных.
 Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Sibirev A.V. – general supervision, formulation of research objectives, scientific editing of the manuscript; Ovchinnikov A.Yu. – manuscript preparation, data collection, literature analysis, formulation of conclusions; Teterin V.S. – manuscript editing, manuscript revision, literature analysis, formulation of conclusions; Panferov N.S. – data collection, manuscript revision, literature analysis; Pekhnov S.A. – data collection, manuscript preparation, literature analysis.
 The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию
 Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on
 The paper was accepted for publication on

04.09.2025
 26.11.2025

EDN: UUFYAT

DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-4-29-34

Научная статья
УДК 631.358: 633.521

Условие подъема лент льнотресты подбирающим барабаном

Роман Анатольевич Ростовцев,
доктор технических наук, профессор РАН,
член-корреспондент РАН, директор,
e-mail: r.rostovcev@fncl.ru;

Виктор Григорьевич Черников,
доктор технических наук, профессор,
член-корреспондент РАН,
главный научный сотрудник,
e-mail: v.chernikov@fncl.ru;

Геннадий Анатольевич Перов,
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: g.perov@fncl.ru;

Владислав Юрьевич Романенко,
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: v.romanenko@fncl.ru;
Михаил Геннадьевич Перов,
научный сотрудник,
e-mail: mexanikuspost@yandex.ru

Федеральный научный центр лубяных культур, г. Тверь, Российская Федерация

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках Государственного задания ФГБНУ ФНЦ ЛК (№ FGSS-2022-0005).

Реферат. Отметим, что приготовление тресты является важным этапом производства льна. Средства механизации, которые задействованы в этих процессах, существенно влияют на показатели качества подготовки тресты. *(Цель исследования)* Анализ динамики работы подборщика лент льна и исследование взаимодействия со стеблями пальцев подбирающего барабана в зависимости от его конструктивных параметров в трудных условиях уборки. *(Материалы и методы)* Изучение процесса подъема льнотресты подбирающим барабаном с применением уравнения Лагранжа II рода. *(Результаты и обсуждение)* Определены закономерности взаимодействия барабана и пальцев подборщика с группой стеблей. Получена зависимость полярного радиуса группы сцепленных стеблей от времени и условия их транспортирования без смещения с пальцев. Установлено, что необходимо обеспечить такие режимы, чтобы относительная скорость равнялась или была меньше нуля и направлена от конца пальца к центру вращения пальцев. Графически представлено влияние параметров угловой скорости вращения барабана, угла отклонения расстояния, радиуса барабана и коэффициента трения скольжения на изменение полярного радиуса группы стеблей. *(Выводы)* Для транспортирования группы сцепленных стеблей без смещения с пальцев относительная скорость должна быть равна или меньше нуля и направлена от конца пальца к центру вращения пальцев. Отмечено, что наиболее интенсивно полярный радиус реагирует на изменение угловой скорости. Результаты исследования использованы при проектировании подбирающего барабана инновационного подборщика-оборачивателя.

Ключевые слова: льнотреста, подбирающий аппарат, пальцы подбирающего аппарата, стебли льна.

■ **Для цитирования:** Ростовцев Р.А., Черников В.Г., Перов Г.А., Романенко В.Ю., Перов М.Г. Условие подъема лент льнотресты подбирающим барабаном // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2025. Т. 19. N4. С. 29-34. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-4-29-34. EDN: UUFYAT.

Scientific article

The Condition for Lifting Flax Retted Straw Ribbons by the Pickup Drum

Roman A. Rostovtsev,
Dr.Sc.(Eng.), professor, corresponding member of the
Russian Academy of Sciences, chief researcher,
e-mail: r.rostovcev@fncl.ru;

Viktor G. Chernikov,
Dr.Sc.(Eng.), professor, corresponding member of the
Russian Academy of Sciences, chief researcher,
e-mail: v.chernikov@fncl.ru;

Gennady A. Perov,
Ph.D.(Eng.), leading researcher,
e-mail: g.perov@fncl.ru;

Vladislav Yu. Romanenko,
Ph.D.(Eng.), leading researcher,
e-mail: v.romanenko@fncl.ru;

Mikhail G. Perov,
researcher,
e-mail: mexanikuspost@yandex.ru

Federal Researcher Center for Bast Fiber Crops, Tver, Russian Federation

This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the State Assignment for the Federal Scientific Center for Bast Crops (No. FGSS-2022-0005).

Abstract. The preparation of flax retted straw is recognized as a critical stage in the flax production cycle. The performance of mechanized equipment used in this process significantly impacts the quality indicators of the resulting retted straw. (*Research purpose*) To analyze the dynamics of the ribbon pickup mechanism and examine the interaction between the pickup drum fingers and flax stems, taking into account the drum's design parameters and challenging harvesting conditions. (*Materials and methods*) Theoretical analysis of the pickup drum dynamics and the interaction between its fingers and the flax stems was conducted using Lagrange's equations of the second kind. (*Results and discussion*) The study established the regularities governing the interaction between the drum fingers and a group of flax stems. A time-dependent function was derived to describe the polar radius of coupled stems, along with the conditions required for their stable transport without slipping off the fingers. It was determined that effective transport occur when the relative velocity is zero or negative and directed from the fingertip toward the center of rotation. Graphs were constructed to illustrate the effect of key parameters, such as the drum's angular velocity, deviation angle, drum radius, and the coefficient of sliding friction, on the polar radius of the stem group. (*Conclusions*) The analysis revealed that the polar radius is most sensitive to variations in the angular velocity of the pickup drum. The findings of this study were incorporated into the design of a pickup drum for an innovative pickup-and-turning device.

Keywords: flax retted straw, pickup mechanism, pickup fingers, flax stems.

For citation: Rostovtsev R.A., Chernikov V.G., Perov G.A., Romanenko V.Yu., Perov M.G. The condition for lifting flax retted straw ribbons by the pickup drum. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N4. 29-34 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-4-29-34. EDN: UUFYAT.

Для механизации возделывания сельскохозяйственных культур и повышения плодородия почвы необходимы технические средства, которые позволят при использовании ресурсов растений получать максимально возможный урожай с заданными параметрами качества и обеспечат расширенное воспроизводство плодородия почв [1, 2]. В связи с этим создание и постоянное совершенствование технологических процессов, машин и рабочих органов не теряют своей актуальности [3].

При уборке различных сельскохозяйственных культур широко используются подборщики стеблей разнообразной конструкции. Работе подборщиков посвящены многие исследования [4, 5], тем не менее, еще мало изучены закономерности взаимодействия барабана и пальцев барабанного подборщика с растительным материалом. Эти аспекты частично освещены в более ранних исследованиях [6], но остается неясным влияние конструктивных параметров подбирающего барабана и условий уборки.

Цель исследования. Анализ динамики работы подборщика и исследование взаимодействия со стеблями пальцев подбирающего барабана в зависимости от конструктивных его параметров и уборки льна в трудных условиях.

Материалы и методы. В подбирающих аппаратах барабанного типа подъем стеблей льна с поля производится подбирающими пальцами. Они могут быть жестко установлены на кожухе барабана или на кулисной оси, входящей в конструкцию барабана [7]. Взаимодействие пальцев со стеблями льна во время подбора рассмотрено в [9-12]. В работе [8] при анализе процесса подбора пальцем сте-

бель принят как материальная точка, на которую действуют различные силы (Miu P. Combine harvesters: theory, modeling, and design. CRC Press. 2016. 482; Хайлис Г.А. Теория льноуборочных машин. М.: Росинформагротех, 2011. 322 с.). В ряде исследований [12, 13] приводятся уравнения пути и скорости стебля по пальцу при его равномерном вращении ($\omega_n = const$ и $\varepsilon_n = 0$) (Черников В.Г. Машины для уборки льна (конструкция, теория и расчет). М.: ИНФРА-М, 1999. 210 с.).

Рассмотрим динамику работы подбирающего барабана и взаимодействие его пальцев со стеблями с применением уравнений Лагранжа II рода.

Результаты и обсуждение. Пусть при перемещении подбирающего барабана по полю его пальцы подобрали группу M сцепленных стеблей на высоте h_0 и осуществляют их подъем (рис. 1). Высота подбора зависит от степени искривления лежащих на почве стеблей и неровностей почвы. Прямые стебли на выровненной поверхности могут быть подобраны пальцами барабана на довольно незначительной высоте h_0 . Высота подбора изогнутых стеблей или при неровном поле будет больше. При дальнейшем движении группа стеблей будет совершать сложную траекторию движения вместе с пальцем подбирающего барабана и движение относительно пальца.

Скорость стеблей V_r относительного движения направлена вдоль пальца, т.е. по линии O_1M . Эта линия находится под углом ψ к вертикали O_1B , которая проведена вниз из центра вращения пальцев O_1 . Скорость переносного движения стеблей V_c перпендикулярна линии пальца и направлена в сторо-

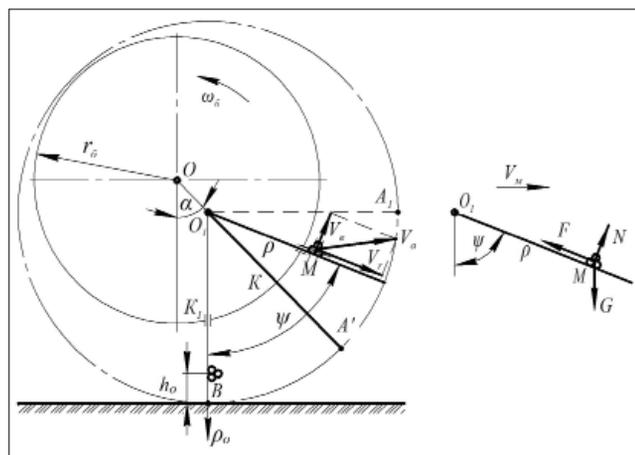


Рис. 1. Схема взаимодействия пальцев барабана с группой \$M\$ стеблей (слева) и действие сил на группу \$M\$ стеблей (справа)

Fig. 1. Diagram of the interaction between the drum fingers and a group of \$M\$ stems (left); and the forces acting on the group of \$M\$ stems (right)

ну его вращения. Абсолютная скорость движения стеблей \$V_a\$ определяется геометрическим сложением скоростей \$V_r\$ и \$V_e\$.

Исследуем движение группы стеблей в полярной системе координат с началом (полюсом) в центре вращения пальца \$O_1\$ и полярной осью \$\rho_0\$, совпадающей с вертикалью \$O_1B\$. Угол положения полярного радиуса группы стеблей \$\psi\$ будем отсчитывать от продолжения линии \$O_1B\$ в сторону вращения пальца. Если исходить из того, что ось вращения пальца \$O_1\$ перемещается вместе с агрегатом поступательно, прямолинейно и равномерно, то выбранная система полярных координат будет перемещаться относительно земли поступательно, прямолинейно и равномерно со скоростью машины \$V_m\$.

Рассмотрим взаимодействие группы стеблей с пальцем и траекторию ее движения, применив дифференциальные уравнения в обобщенных координатах (уравнения Лагранжа II рода).

Положение группы \$M\$ стеблей, принимаемое за механическую систему, будет определено, если известны координаты ее центра тяжести \$\psi\$ и \$\rho\$. Вследствие этого имеем две обобщенные координаты \$\psi\$ и \$\rho\$ (поворот группы стеблей вокруг оси, проходящей через ее центр тяжести, рассматривать не будем).

Тогда уравнения Лагранжа II рода будут следующие:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\psi}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \psi} = Q_\psi \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\rho}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \rho} = Q_\rho \end{cases} \quad (1)$$

где \$T\$ – кинетическая энергия группы стеблей при их движении в выбранной системе координат; \$Q_\psi\$ и \$Q_\rho\$ – обобщенные силы; \$\psi\$ и \$\rho\$ – обобщенные скорости.

При допущении того, что сопротивление воздуха при расчете кинетической энергии \$T\$ не учитывается в выбранной системе координат:

$$\begin{aligned} T &\approx \frac{m_{rc} V_a^2}{2} + \frac{m_{rc}}{2} r_{ei}^2 \omega_{i0}^2 = \\ &= \frac{m_{rc}}{2} (V_e^2 + V_r^2 + r_{ei}^2 \omega_{i0}^2), \end{aligned} \quad (2)$$

где \$m_{rc}\$ – масса группы стеблей; \$V_a\$ – абсолютная скорость группы стеблей; \$V_r\$ – относительная скорость группы стеблей, которая равна \$\rho\$; \$r_{ei}\$ – радиус инерции группы стеблей относительно оси, перпендикулярной плоскости рисунка и проходящей через центр тяжести группы стеблей; \$\omega_{i0}\$ – угловая скорость вращения группы стеблей в относительном движении, т.е. относительно оси, которая проходит через центр тяжести группы стеблей перпендикулярно плоскости рисунка.

Принимая, что при работе подборщика поднимающиеся стебли не поворачиваются относительно пальца, но могут повернуться совместно с ним, будем считать, что \$\omega_{i0} \approx \dot{\psi}\$, где \$\dot{\psi}\$ – угловая скорость вращения пальца. Учитывая, что скорость \$V_r = (\psi\rho)\$, находим:

$$\begin{aligned} T &\approx \frac{m_{rc}}{2} [(\dot{\psi}\rho)^2 + \rho^2 + r_{ei}^2 (\dot{\psi})^2] = \\ &= \frac{m_{rc}}{2} [(r_{ei}^2 + \rho^2) \dot{\psi}^2 + \rho^2]. \end{aligned} \quad (3)$$

Из полученного уравнения следует:

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial \dot{\psi}} = m_{rc} (r_{ei}^2 + \rho^2) \dot{\psi}; \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\psi}} \right) = \frac{d}{dt} [m_{rc} (r_{ei}^2 + \rho^2) \dot{\psi}] = \\ = m_{rc} (r_{ei}^2 + \rho^2) \ddot{\psi} + m_{rc} 2\rho \dot{\rho} \dot{\psi} \\ \frac{\partial T}{\partial \dot{\rho}} = m_{rc} \dot{\rho}; \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\rho}} \right) = m_{rc} \ddot{\rho}; \quad \frac{\partial T}{\partial \rho} = m_{rc} \rho \dot{\psi}^2. \end{cases} \quad (4)$$

Для нахождения обобщенных сил представим поочередно возможные перемещения стеблей (рис. 1б), при которых изменяется только одна обобщенная координата (сначала \$\psi\$, потом \$\rho\$). Затем составим сумму элементарных работ указанных сил на каждом таком перемещении.

На группу \$M\$ стеблей (рис. 1б) будут действовать:

- сила тяжести \$G = m_{rc} \cdot g\$ (\$g\$ – ускорение свободного падения);
- нормальная реакция \$N\$;
- сила трения \$F = f \cdot N\$ (\$f\$ – коэффициент трения скольжения), направленная противоположно вектору относительной скорости \$\vec{V}_r\$.

На основании изложенного уравнения для определения обобщенных сил имеют вид:

$$\begin{cases} \delta A_\psi = [N - m_{rc} g \sin \psi] \rho \delta \psi \\ \delta A_\rho = [m_{rc} g \cos \psi - F] \delta \rho \end{cases} \quad (5)$$

Из этих уравнений находим.

$$\begin{cases} Q_\psi = [N - m_{rc}g \sin \psi] \rho \\ Q_\rho = m_{rc}g \cos \psi - fN \end{cases} \quad (6)$$

Подставив полученные выражения в уравнение (1), получим:

$$\begin{cases} m_{rc}(r_{ei}^2 + \rho^2)\ddot{\psi} + 2m_{rc}\rho\dot{\rho}\dot{\psi} = N\rho - m_{rc}g\rho \sin \psi \\ m_{rc}\ddot{\rho} - m_{rc}\rho\dot{\psi}^2 = m_{rc}g \cos \psi - fN \end{cases} \quad (7)$$

Учитывая, что $r_{ei}^2 \ll \rho$:

$$\begin{cases} m_{rc}\rho^2\ddot{\psi} + 2m_{rc}\rho\dot{\rho}\dot{\psi} = N\rho - m_{rc}g\rho \sin \psi \\ m_{rc}\ddot{\rho} - m_{rc}\rho\dot{\psi}^2 = m_{rc}g \cos \psi - fN \end{cases} \quad (7a)$$

Из первого уравнения (7a) находим:

$$N = \frac{m_{rc}(\rho^2\ddot{\psi} + 2\rho\dot{\rho}\dot{\psi} + g\rho \sin \psi)}{\rho} = m_{rc}(\rho\ddot{\psi} + 2\dot{\rho}\dot{\psi} + g \sin \psi). \quad (8)$$

Подставим это значение N во второе уравнение (7a), получим:

$$\ddot{\rho} + 2f\dot{\rho}\dot{\psi} - \rho(\dot{\psi}^2 - f\ddot{\psi}) = g[\cos \psi - f \sin \psi] \quad (9)$$

Для упрощения уравнения (9) примем, что подбор стеблей пальцами имеет место при небольшом угле поворота пальцев ψ , начиная от положения O_1K_0 до O_1A_1 (рис. 2), в котором из-за положения точки A_1 на уровне точки O_1 стебли будут удерживаться и не скатятся с пальцев вправо и вниз.

В пределах угла $K_0O_1A_1$ считаем, что угловая скорость существенно не изменяется, значит $\dot{\psi} \approx \omega_{\text{пер}} \approx \text{const}$, где $\omega_{\text{пер}}$ – средняя угловая скорость вращения пальца. Тогда $(\dot{\psi} \rightarrow 0)$, и уравнение (9) приводится к виду:

$$\ddot{\rho} + 2f\dot{\rho}\omega_{\text{пер}} - \omega_{\text{пер}}^2\rho \approx g[\cos \psi - f \sin \psi]. \quad (10)$$

Для определения зависимости $\omega_{\text{пер}}$ от угловой скорости вращения барабана ω_δ обратимся к рисунку 2. На нем схема барабана аналогична схеме на рисунке 1 с тремя положениями пальца, но построены скорости точек K_0 , K и K_1 барабана при вращении вокруг точки O и пальцев при вращении вокруг точки O_1 при их относительном движении (движение пальца относительно барабана в точках K_0 , K и K_1). Точки K барабана и пальца имеют одинаковую скорость (ω_δ и r_δ – угловая скорость вращения барабана и его радиус).

Барабан является ведущим звеном, а палец – ведомым. Вследствие этого, как уже отмечалось, точка K пальца будет двигаться с такой же скоростью, как точка K барабана, относительное движение между ними в этот миг отсутствует. Точка барабана в положении K_0 имеет скорость V_δ , которая перпендикулярна радиусу OK_0 ; точка пальца в этом же положении K_0 имеет скорость V_Π , которая перпендикулярна радиусу O_1K_0 ; скорость $V_{\text{бп}}$ барабана относительно пальца в точке K_0 направлена по линии пальца. Все эти векторы скоростей построены в точке K_0 , тогда как в точке K построен только вектор V_δ , который,

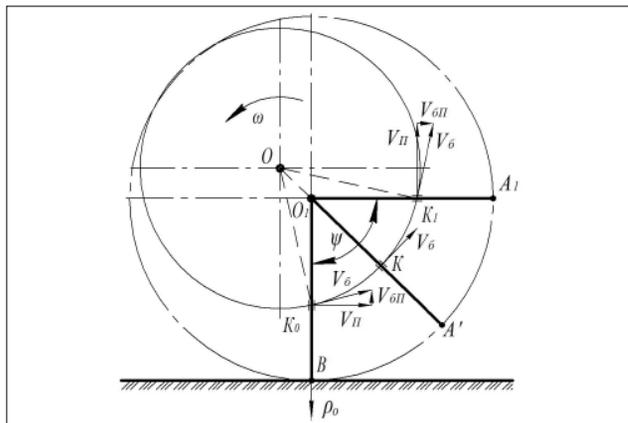


Рис. 2. Схема подбирающего барабана с тремя положениями пальца

Fig. 2. Diagram of the pickup drum with three finger positions

как уже отмечалось, представляет собой скорость точки K барабана и скорость точки K пальца.

Из рисунка 2 видно, что в пределах дуги окружности барабана от точки K_0 до точки K_1 скорость V_Π очень близка по величине к скорости V_δ . Вследствие этого не будет большой погрешности, если принять, что $V_\Pi \approx V_\delta$. Тогда можно считать, что $\psi \approx V_\delta/r_\Pi$. С учетом вышеизложенных данных $V_\delta = r_\delta \omega_\delta$ и $V_\delta \approx r_\Pi \dot{\psi}$. Поскольку левые части этих уравнений равны, то равны и правые части, т.е. $r_\delta \omega_\delta \approx r_\Pi \dot{\psi}$, откуда находим $\dot{\psi} \approx \omega_\delta(r_\delta / r_\Pi)$.

В пределах дуги окружности от точки K_0 до K_1 расстояние r_Π (это расстояние O_1K_0 , O_1K и O_1K_1) мало отличается, поэтому не будет большой погрешностью считать эти расстояния равными O_1K , т.е. $r_\delta - a$ (a – расстояние OO_1). Тогда $\omega_{\text{пер}}$, равное среднему значению угловой скорости пальца, будет:

$$\omega_{\text{пер}} \approx \omega_\delta \frac{r_\delta}{r_\delta - a}. \quad (11)$$

Подставим $\omega_{\text{пер}}$ в уравнение (10):

$$\begin{aligned} \ddot{\rho} + 2f\dot{\rho}\omega_\delta \frac{r_\delta}{r_\delta - a} - \omega_\delta^2 \left(\frac{r_\delta}{r_\delta - a} \right)^2 \rho \approx \\ \approx g[\cos \psi - f \sin \psi]. \end{aligned} \quad (12)$$

Это линейное дифференциальное уравнение второго порядка с постоянными коэффициентами и правой частью, которая отличается от нуля. Решением этого уравнения является зависимость полярного радиуса ρ от времени t , т.е. зависимость положения группы M сцепленных стеблей от времени t . С другой стороны, при известной зависимости угла ψ от времени t можно определить зависимость ρ от ψ и установить траекторию движения группы стеблей, поднимающихся в выбранной системе координат.

Уравнение (12) решается с известным приближением (в пределах угла ψ) от вертикали BK_0O_1 до горизонтали O_1A_1 (рисунки 1 и 2). Как уже отмечалось, угол ψ отсчитывается от оси $O_1\rho_0$ против часовой стрелки.

Угол ψ зависит от влияющих на него факторов следующим образом (Кузьмина Т.О. Развитие теории і технології одержання модифікованих лляних волокон функціонального призначення // автореф. ... д-ра техн. наук. Херсон, 2008. 44 с.):

$$\psi = \arcsin \frac{\sin(\omega_6 t - \alpha)}{\sqrt{1 + \left(\frac{a}{r_6}\right)^2 - 2\left(\frac{a}{r_6}\right) \cos(\omega_6 t - \alpha)}}, \quad (13)$$

где α – угол отклонения расстояния OO_1 между осями вращения барабана и пальца относительно вертикали, проходящей через центр O окружности барабана (см. рис. 1).

Для того чтобы подобранная рядом пальцев группа M сцепленных стеблей не смещалась с этих пальцев (вправо и вниз), относительная скорость V_r (т.е. ρ) должна быть равна или меньше нуля, т.е. направлена от конца пальца к центру O_1 (см. рис. 1). Из этого условия осуществляется расчет угловой скорости вращения барабана.

В результате решения дифференциального уравнения (13) методом Рунге–Кутты с помощью компьютерной системы *Mathcad* (Максфилд Б. *Mathcad* в инженерных расчетах. СПб.: КОРОНА-ВЕК, 2010. 368 с.) было проанализировано влияние ряда факторов на зависимость при следующих значениях параметров:

- угловая скорости вращения барабана $\omega_6 = 15-25 \text{ с}^{-1}$;
- угол отклонения расстояния $OO_1 - \alpha = (7/36)\pi$;
- расстояние $OO_1 - a = 0,05 \text{ м}$;
- радиуса барабана $r = 0,15 \text{ м}$;
- коэффициент трения скольжения $f = 0,8$.

Согласно рисунку 3, относительная скорость пальца V_r (т.е. ρ) при перемещении от $t = 0$ до $t = 0,08 \text{ с}$ (на нижнем участке пути) направлена вниз. При увеличении угловой скорости ω от 14 до 24 с^{-1} от-

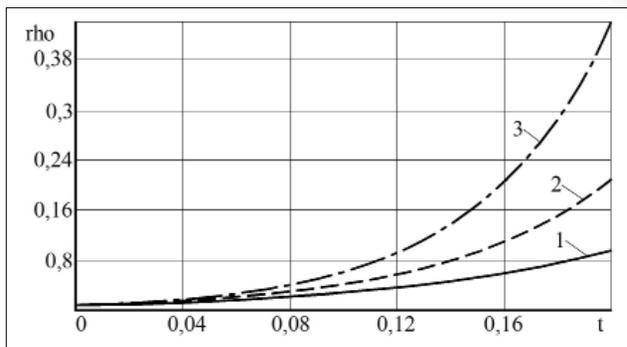


Рис. 3. Зависимость полярного радиуса от времени при угловой скорости ω : 1 – 14 с^{-1} ; 2 – 19 с^{-1} ; 3 – 24 с^{-1}

Fig. 3. Dependence of the polar radius on time and angular velocity ω : 1 – 14 s^{-1} ; 2 – 19 s^{-1} ; 3 – 24 s^{-1}

носительная скорость также увеличивается и направлена вверх.

Выводы. Получена зависимость полярного радиуса группы сцепленных стеблей от времени и условия их транспортирования без смещения с пальцев. Для этого необходимо обеспечить такие режимы, чтобы относительная скорость V_r (т.е. ρ) равнялась или была меньше нуля и направлена от конца пальца к центру вращения пальцев O_1 .

Графически представлено влияние параметров угловой скорости вращения барабана (ω_6), расстояния $OO_1 - a$, угла отклонения расстояния OO_1 (α), радиуса барабана (r_6) и коэффициента трения скольжения (f) на изменение полярного радиуса (ρ) группы стеблей. Наиболее интенсивно полярный радиус реагирует на изменение угловой скорости.

Результаты исследования использованы при проектировании подбирающего барабана инновационного подборщика-оборачивателя (Патент RU 2776522).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лобачевский Я.П., Алдошин Н.В. Технология и технические средства для реализации методов воспроизводства плодородия почвы // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. N2. С. 40-46. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-40-46.
2. Dorokhov A.S., Sibirev A.V., Aksenov A.G. Dynamic systems modeling using artificial neural networks for agricultural machines. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2019. Vol. 58. N2. 63-74. DOI: 10.35633/INMATEH-58-07.
3. Бейлис В.М., Ценч Ю.С., Коротченя В.М. и др. Тенденции развития прогрессивных машинных технологий и техники в сельскохозяйственном производстве // *Вестник ВИЭСХ*. 2018. N4 (33). С. 150-156. EDN: YTHPID.
4. Лачуга Ю.Ф., Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Шогенов Ю.Х. Научно-технические достижения агроинженерных научных учреждений для производства основных групп сельскохозяйственной продукции // *Техника и оборудование для села*. 2021. N4(286). С. 2-11. DOI: 10.33267/2072-9642-2021-4-2-11.
5. Ковалев М.М., Ростовцев Р.А., Дмитриев В.И. Исследование работы подбирающего аппарата // *Достижения науки и техники АПК*. 2006. N10. С. 39-42.
6. Еремин П.А., Михеев В.В., Текушев А.Х. и др. Рабочие органы горизонтально-конвейерного типа для сгребания травяной массы // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2019. Т. 13. N1. С. 48-52. DOI: 10.22314/2073-7599-2018-13-1-48-52.
7. Огнев И.И. Анализ классификации и технологических схем подборщиков // *Известия Международной академии аграрного образования*. 2011. N11. С. 55-57. EDN: OCBUBL.
8. Черников В.Г., Ростовцев Р.А., Романенко В.Ю. Исследование аппарата с жесткими пальцами для подбора льна // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2011. N2. С. 34-36. EDN: NXYZEP.
9. Черников В.Г., Романенко В.Ю. Анализ работы подбирающего аппарата льнотресты с подпружиненными пальцами // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2016. N3. С. 17-20. EDN: WAIJPZ.

10. Огнев И.И. Результаты исследования подбирающего пальца, выполненного в виде кольцевого витка, транспортерного подборщика зерноуборочного комбайна // *Известия Международной академии аграрного образования*. 2015. N25-1. С. 123-126. EDN: UZBWJH.
11. Лачуга Ю.Ф., Ковалев М.М., Дмитриев В.И. Обоснование параметров подбирающего аппарата лубяных культур // *Техника в сельском хозяйстве*. 2007. N5. С. 3-6. EDN: IBOTAH.
12. Chernikov V.G. Research of basic parameters of spreading device and power to flax stems moving. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2015. N1. 24-27. EDN: TIMDVB.
13. Родионов Л.В., Ковалев М.М. Совершенствование аппаратов для подбора стеблей лубяных культур // *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 1988. N8. С. 44-46.

REFERENCES

1. Lobachevsky Ya.P., Aldoshin N.V. Technology and technical means for the implementation of methods of reproduction of soil fertility. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N2. 40-46 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-40-46.
2. Dorokhov A.S., Sibirev A.V., Aksenov A.G. Dynamic systems modeling using artificial neural networks for agricultural machines. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2019. Vol. 58. N2. 63-74 (In English). DOI: 10.35633/INMATEH-58-07.
3. Beylis V.M., Tsench Yu.S., Korotchenya V.M. et al. Trends in the development of advanced machine technologies and techniques in agricultural production. *Vestnik VIESKh*. 2018. N4 (33). 150-156 (In Russian). EDN: YTHPID.
4. Lachuga Yu.F., Izmailov A.Yu., Lobachevsky Ya.P., Shogonov Yu.Kh. Scientific and technical achievements of agro-engineering scientific institutions for the production of basic groups of agricultural products. *Machinery and Equipment for Rural Areas*. 2021. N4(286). 2-11 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2021-4-2-11.
5. Kovalev M.M., Rostovtsev R.A., Dmitriev V.I. Investigation of the operation of the matching apparatus. *Achievements of Science and Technology of the Agroindustrial Complex*. 2006. N10. 39-42 (In Russian).
6. Eremin P.A., Mikheev V.V., Tekushev A.Kh. et al. Horizontal conveyor type working bodies for raking grass. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2019. Vol. 13. N1. 48-52 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2018-13-1-48-52.
7. Ognev I.I. Analysis of classification and technological schemes of pickers. *Proceedings of the International Academy of Agrarian Education*. 2011. N11. 55-57 (In Russian). EDN: OCBUBL.
8. Chernikov V.G., Rostovtsev R.A., Romanenko V.Yu. Investigation of an apparatus with human fingers for flax selection. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2011. N2. 34-36 (In Russian). EDN: NXYZEP.
9. Chernikov V.G., Romanenko V.Yu. Analysis of the operation of the flax-trestle pick-up device with spring-loaded fingers. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2016. N3. 17-20 (In Russian). EDN: WAIJPZ.
10. Ognev I.I. The results of the study of the picking finger, made in the form of an annular coil, of the conveyor baler of a combine harvester. *Proceedings of the International Academy of Agricultural Education*. 2015. N25-1. 123-126 (In Russian). EDN: UZBEKWJH.
11. Lachuga Yu.F., Kovalev M.M., Dmitriev V.I. Substantiation of the parameters of the bast crop selection apparatus. *Machinery in Agriculture*. 2007. N5. 3-6 (In Russian). EDN: IBOTAH.
12. Chernikov V.G. Research of basic parameters of spreading device and power to flax stems moving. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2015. N1. 24-27 (In Russian). EDN: TIMDVB.
13. Rodionov L.V., Kovalev M.M. Improvement of devices for selecting stems of bastcrops. *Tractors and Agricultural Machinery*. 1988. N8. 44-46 (In Russian).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Ростовцев Р.А. – постановка задачи, общее руководство, анализ результатов, визуализация;
 Черников В.Г. – научное руководство, постановка проблемы, разработка решения;
 Перов Г.А. – подготовка текста, формирование выводов;
 Романенко В.Ю. – формирование выводов, подготовка материала к публикации;
 Перов М.Г. – литературный анализ, проведение исследования, доработка текста.
 Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Rostovtsev R.A. – problem statement, overall supervision, result analysis, visualization;
 Chernikov V.G. – scientific supervision, problem statement, development of the solution;
 Perov G.A. – manuscript preparation, formulation of conclusions;
 Romanenko V.Yu. – formulation of conclusions, preparation of the manuscript for publication;
 Perov M.G. – literature review, conducting the research, manuscript refinement.
 The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию
 Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on
 The paper was accepted for publication on

30.09.2025
 26.11.2025

EDN: VDVJBY

DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-4-35-41



Научная статья

УДК 631.816.31



Известкование почв – путь к повышению эффективности растениеводства

Николай Васильевич Алдошин,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: naldoshin@yandex.ru;

Андрей Сергеевич Золотарев,
младший научный сотрудник,
e-mail: zl200@yandex.ru;

Сергей Андреевич Квас,
младший научный сотрудник,
e-mail: kvas.sergo@yandex.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Отмечено, что в России около 25,5 миллиона гектаров пахотных земель характеризуется повышенной кислотностью (рН менее 5,5), что приводит к снижению до 30 процентов урожайности основных культур и значительному падению эффективности применения минеральных удобрений. (*Цель исследования*) Поиск возможных путей раскисления почв и технического решения данной проблемы. (*Материалы и методы*) Проанализированы результаты эксперимента с доломитовой мукой грубого помола на черноземных суглинистых почвах, показавшие эффективность метода в нейтрализации кислотности. Исследуются биохимические процессы при внесении известковых материалов и их влияние на структуру почвы. (*Результаты и обсуждение*) Известкование – ключевой метод понижения кислотности почвы и создания оптимальных условий для жизнедеятельности микроорганизмов, что способствует более рациональному использованию минеральных удобрений. Кроме того, известкование формирует геохимический барьер, который предотвращает вымывание подвижных элементов из почвы и сокращает вынос биогенов в водоемы. Одним из наиболее перспективных вариантов внесения известковых мелиорантов на данный момент являются универсальные полуприцепы, которые могут оборудоваться дисками разбрасывателями. (*Выводы*) Известкование почв повышает эффективность использования минеральных удобрений, создает оптимальные условия для жизнедеятельности почвенных микроорганизмов. Также в 1,4-2,7 раза повышается эффективность использования азотистых удобрений, а коэффициент использования фосфорных удобрений возрастает на 10-15 процентов. Доломитовая мука грубого помола эффективно снижает кислотность почвы. Для раскисления почвы от среднекислой до слабокислой (рН_{KCl} 5,3-5,6) необходимо вносить известковые материалы в дозах 4 тонны на гектар.

Ключевые слова: почва, кислотность, известкование, мелиоранты, минеральные удобрения, сидераты.

■ **Для цитирования:** Алдошин Н.В., Золотарев А.С., Квас С.А. Известкование почв – путь к повышению эффективности растениеводства // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2025. Т. 19. N4. С. 35-41. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-4-35-41. EDN: VDVJBY.

Scientific article

Soil Liming as a Way to Increase Crop Production Efficiency

Nikolay V. Aldoshin,
Dr.Sc.(Eng.), professor,
e-mail: naldoshin@yandex.ru;

Andrey S. Zolotarev,
junior researcher,
e-mail: zl200@yandex.ru;

Sergey A. Kvas,
junior researcher,
e-mail: kvas.sergo@yandex.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. Approximately 25.5 million hectares of arable land in Russia are characterized by high acidity (pH below 5.5), which leads to up to a 30 percent reduction in the yield of major crops and a significant decline in the efficiency of mineral fertilizers. (*Research purpose*) To identify effective approaches for reducing soil acidity and to develop technical solutions for their practical implementation. (*Materials and methods*) The study analyzed the results of an experiment involving the application of coarsely ground dolomite flour to loamy chernozem soils, which demonstrated the effectiveness of this method in neutralizing soil acidity.

The biochemical processes induced by liming materials and their influence on soil structure were also examined. (*Results and discussion*) Liming is a key method for reducing soil acidity, as it creates optimal conditions for microbial activity and enhances the efficiency of mineral fertilizer use. Moreover, it forms a geochemical barrier that prevents the leaching of mobile elements from the soil and helps reduce nutrient runoff into nearby water bodies. One of the most promising current approaches to applying lime-based soil ameliorants is the use of universal semi-trailers equipped with disc spreaders. (*Conclusions*) Liming increases the efficiency of mineral fertilizer use and creates favorable conditions for soil microbial activity. The efficiency of nitrogen fertilizer utilization increases by 1.4 to 2.7 times, while the uptake of phosphorus fertilizers improves by 10-15%. Coarsely ground dolomite flour has proven effective in reducing soil acidity. To deacidify the soil from moderately acidic to slightly acidic conditions (рНKCl 5.3-5.6), lime materials should be applied at a rate of 4 tons per hectare.

Keywords: soil, acidity, liming, ameliorants, mineral fertilizers, green manure crops, siderates..

For citation: Aldoshin N.V., Zolotarev A.S., Kvas S.A. Soil liming as a way to increase crop production efficiency. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N4. 35-41 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-4-35-41. EDN: VDVJBY.

В России в период с 1990-х годов произошло резкое сокращение земельных площадей сельскохозяйственного назначения, в том числе пахотных. Сокращение площади земель, занятых посевами зерновых растений, по данным Росстата, продолжалось до 2010 г., территория посевных угодий уменьшилась на 30% (рис. 1).

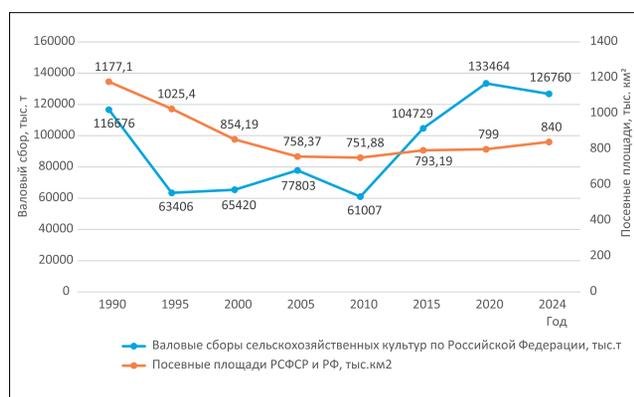


Рис. 1. Производство сельскохозяйственных культур относительно посевных площадей

Fig. 1. Crop yield relative to sown area

С 2010 г. началось постепенное восстановление посевных угодий путем повторной разработки отчужденных ранее площадей. Аграрии стремятся увеличить урожайность, выпускать больше продовольствия и обеспечить им растущее население с меньшего количества земельных ресурсов. Добиться этого можно только путем существенного увеличения показателей урожайности и улучшения качества выращиваемой продукции.

Среди причин, которые препятствуют наращиванию объемов продукции растениеводства в районах с интенсивным земледелием, можно выделить две ключевые проблемы: изменение кислотности почвы и нарушение баланса питательных веществ в растениях [1]. На урожайность зерновых и бобовых культур влияют также обеспеченность пита-

тельными веществами, состояние почвы и многие другие факторы. По моему мнению, кислотность почвы на данный момент является наиболее актуальной проблемой, так как для ее решения нет системного подхода (Осипов А.И. Известкование кислых почв в историческом аспекте. Агрофизика от А.Ф. Иоффе до наших дней. СПб.: АФИ, 2002. С. 275-289).

Ввиду резкого сокращения посевных площадей интенсификация производства сельскохозяйственной продукции проводилась путем увеличения применения минеральных удобрений с 15,2 до 32,2 млн т в действующем веществе и средств защиты растений. Тем временем внесение органических удобрений сократилось в 5 раз, а известковых материалов в 7-8 раз. Данные меры позволили восстановить и увеличить валовый объем производства зернобобовых культур. Повзрослел объем производства продукции растениеводства, ее общий валовый сбор превзошел показатели 1990 г. (таблица).

Период	Известковые материалы	Органические удобрения
1990-1995 гг.	16,0	260,0
1996-2000 гг.	2,0	80,2
2001-2005 гг.	2,5	56,8
2006-2010 гг.	2,1	42,8
2011-2015 гг.	2,1	58,0
2016-2020 гг.	2,3	69,0
2020-2024 гг.	2,3	71,3

В сельскохозяйственных предприятиях в 2024 г. внесение минеральных удобрений достигло максимума – свыше 3,607 млн т, на 4% больше, чем годом ранее, и в 2,6 раза больше, чем в 2000 г. Удельное внесение минеральных удобрений составило 43 кг/га. Однако опыт европейских стран, например Германии, показывает, что внесение минераль-

ных удобрений в среднем 116 кг/га не приводит к деградации почвенного ресурса, так как известкование почвы и операции по снижению уровня кислотности проводятся на постоянной основе. Это позволяет эффективно использовать удобрения, предотвращая деградацию почвы. В публикациях А.В. Литвиновича приводятся сведения о применении мергель для известкования еще в 12-м веке [3].

Увеличение объемов использования средств защиты растений и минеральных удобрений создает проблему в отношении кислотного состава почвы. В России около 25,5 млн га пахотных земель характеризуется повышенной кислотностью, когда pH менее 5,5. При $\text{pH} < 6$ урожайность основных культур снижается до 30%. Эффективность внесения азотных удобрений падает на 15-60%, фосфорных – 18-70%, калийных – 20-60% в зависимости от исходной кислотности [4]. Ситуация осложняется снижением внесения фосфорных удобрений с 71 кг/га действующего вещества в 1990 г. до 34,5 кг/га в 2024 г. Статистика по калийным удобрениям аналогичная: их внесение снизилось с 63,2 до 24,7 кг действующего вещества на 1 га. При сравнительно больших объемах внесения азотных удобрений доля фосфорных и калийных сократилась в несколько раз. Повышение кислотности в совокупности со снижением эффективности самих удобрений крайне негативно сказывается на урожайности [5].

На данный момент кислотность почв Черноземной зоны составляет менее 6 ед. pH, что не характерно для этого типа почв. По данным Министерства сельского хозяйства и Центра агрохимической службы «Белгородский», в областях Центрально-Черноземной зоны pH ниже 6. Так, в Липецкой области большая часть пахотных земель на данный момент относятся к среднекислым [6, 7]. Например, кислотность пашни (ед. pH) в Липецкой области изменялась следующим образом: 1990 г. – 6,1; 1995 г. – 6,0; 2000 г. – 5,8; 2005 г. – 5,7; 2010 г. – 5,5; 2015 г. – 5,5; 2020 г. – 5,4; 2024 г. – 5,4.

Цель исследования. Поиск возможных путей раскисления почв и технического решения данной проблемы.

Материалы и методы. Главными причинами подкисления почвы являются два аспекта:

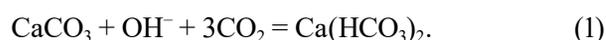
- естественный ход почвообразовательного процесса и климатические процессы: кислые материнские породы, на которых формировалась почва, переувлажнение, состав растительности, деятельность микроорганизмов, корневые выделения, природное выщелачивание;
- антропогенный: избыточное или нерациональное внесение физиологически кислых минеральных удобрений, особенно если они поступают в почву систематически и с нарушением баланса питательных веществ; выщелачивание неусвоенных

нитратов; интенсивная обработка почвы, приводящая к разрушению ее структуры.

Кислотность почвы при уровне pH в пахотном слое меньше 5,5 считается избыточной. Чтобы решить эту проблему, нужно вывести ионы водорода и алюминия из почвенного поглощающего комплекса (ППК). Для этого используют вещества, богатые кальцием и магнием, самые популярные из них – известняковая и доломитовая мука.

В Меньковском филиале Агрофизического института исследовалось влияние доломитовой муки грубого помола на свойства черноземной суглинистой почвы и урожайность. В рамках эксперимента применяли доломитовую муку с размером частиц менее 10 мм в дозах 3,2 и 6,4 т/га. Испытания проводили как без дополнительного фона, так и на фоне применения 5 т/га компоста многоцелевого назначения (КМН). Компост представляет собой смесь куриного помета и верхового торфа в пропорции 1:1 после ее ускоренной ферментации при температуре 80 °С в течение недели. КМН представляет собой однородную сыпучую массу темно-коричневого цвета с влажностью 60-70% и pH_{KCl} в пределах 6,9-7,2. Массовая доля общего азота составляла 1,7%, фосфора (P_2O_5) – 1,5, калия (K_2O) – 1,8% на абсолютно сухое вещество. Исследования показали, что через год после внесения доломитовой муки почва из грации слабокислой (pH_{KCl} 5,3) перешла в грацию нейтральной с pH_{KCl} 6,0 на одинарной дозе извести и с pH_{KCl} 6,1-6,2 на двойной. На фоне внесения 5 т/га КМН отмечается тенденция эффективного влияния доломитовой муки грубого помола на кислотность почвы. В последующие годы это действие сглаживается, что объясняется низкими дозами известковых удобрений [1, 8].

Известняковая мука, которая представляет собой карбонат кальция (CaCO_3), и доломитовая мука, состоящая из смеси карбоната кальция и карбоната магния (MgCO_3), при внесении в почву претерпевают изменения. Они постепенно превращаются в растворимый бикарбонат кальция или магния под воздействием ионов водорода и углекислого газа, содержащихся в почвенном растворе:



Бикарбонат кальция далее диссоциирует на ионы Ca_2^+ и 2HCO_3^- , а также частично подвергается гидролизу:



При этом в почвенном растворе, содержащем ионы хлора, нитратов и сульфатов, повышается концентрация ионов Ca^{2+} и OH-групп. Это приводит к нейтрализации кислотности почвы.

При внесении полной дозы известковых матери-

алов, рассчитанной на основе показателя pH, устраняется как актуальная, так и обменная кислотность почвы. Гидролитическая кислотность значительно снижается, а содержание кальция (и магния) в почвенном растворе возрастает. Кроме того, увеличивается степень насыщенности почв катионами [9, 10].

Эффективность воздействия известковых удобрений на реакцию почвы и ее насыщенность катионами щелочноземельных и других металлов зависят от дозы и формы внесенного вещества. Чем больше доза CaCO_3 и чем тоньше помол агрохимиката, тем быстрее снижается кислотность почв и возрастает степень насыщенности катионами.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Одним из путей нормализации кислотности почвы является включение в севооборот сидеральных культур в качестве органических удобрений для совместного внесения с минеральными удобрениями. Механизм действия сидератов заключается в выделении через корни растений веществ, связывающих свободные ионы водорода. При разложении сидераты обогащают почву органикой, кроме того, мощная корневая система сидератов разрыхляет грунт и улучшает аэрацию.

Использование сидератов не только позволит улучшить структуру почвы и снизить кислотность, но и внести экологически чистый азот. Проблема применения известковых материалов усугубляется отсутствием технических средств для внесения их в больших объемах, при том, что недостатка в природных известковых материалах нет.

Сидераты благодаря своим биохимическим особенностям способны естественным путем снижать кислотность почвы. Наиболее эффективные сидераты:

- горчица белая – лидер среди раскисляющих сидератов с мощной корневой системой. Достигает высоты 60 см за 45 дней;
- фацелия пижмолистная – природный регулятор кислотности, привлекающий полезных насекомых;
- клевер белый – обогащает почву азотом и эффективно разрыхляет грунт.

Методика применения сидератов включает подготовку участка (очистка от растительных остатков), равномерный посев семян по поверхности, закладку зеленой массы на глубину 10-15 см. Использование сидератов является эффективным и экологически безопасным методом коррекции кислотности почвы. При правильном использовании они обеспечивают комплексное улучшение почвенного плодородия и способствуют повышению урожайности сельскохозяйственных культур [10].

В 34 субъектах Российской Федерации ежегодно образуются порядка 20,7 млн т карбонатных отходов, а используются всего 8,9 млн т. На предприя-

тиях, где эти отходы накапливаются в отвалах, потенциально можно производить 12-15 млн т мелиорантов в год. Использование продуктов переработки этих отходов поможет эффективно решить задачу их повторного применения. Особенно актуально это в случаях, когда доставка природных известковых материалов к местам обработки затруднена.

Специалисты Всероссийского научно-исследовательского и проектно-технологического института монокристаллов (ВНИПТИМ) провели ряд исследований, чтобы выяснить, можно ли применять бутарный продукт, фосфогипс и фосфатно-известковый отход Кингисеппского химического комбината в качестве мелиорантов [11, 12].

Известкование в результате нейтрализации излишней кислотности в почвенном слое создает оптимальные условия для жизнедеятельности микроорганизмов и способствует более рациональному использованию минеральных удобрений [13]. Кроме того, формируется геохимический барьер, который предотвращает вымывание подвижных элементов из почвы и сокращает вынос биогенов в водоемы (рис. 2).



Рис. 2. Динамика внесения известковых удобрений и изменения кислотности почвы

Fig. 2. Dynamics of lime fertilizer application and corresponding changes in soil acidity

Стоит подчеркнуть, что на почвах с высокой кислотностью эффективность использования азота из удобрений значительно, в 1,4-2,7 раза ниже, чем на слабокислых и нейтральных почвах. Это также влияет на окупаемость удобрений. Коэффициент использования фосфорных удобрений при их разбросном внесении на сильнокислых почвах составляет всего 1,7-2,0%. Для сравнения: на почвах с благоприятной реакцией этот показатель равен 10-15%, а при локальном внесении – 30% [14].

При культивировании сельскохозяйственных растений на почвах, не обработанных известью, постепенно увеличивается кислотность и происходит накопление фитотоксичных элементов. По данным А.Н. Небольсина и З.П. Небольсиной, содержание подвижных форм алюминия в среднем за год воз-

растает на 1,2%, марганца – на 2,1%, железа – на 2,4%. Основной причиной подкисления неизвесткованных почв является дефицит оснований кальция и магния [15, 3].

Известковые удобрения производятся в гранулированном виде, ввиду этого появляется возможность внесения удобрений с помощью культиваторов растениепитателей [16, 17]. Однако установлено, что данный способ является нецелесообразным и малоэффективным в случае внесения материала с помощью навесных разбрасывателей минеральных удобрений из-за небольшой вместимости заправочных емкостей. А так как норма внесения известковых удобрений составляет от 3 т/га, то необходимо часто осуществлять заправку, и рабочее время будет использоваться нерационально.

Наиболее эффективными устройствами для внесения известковых мелиорантов в настоящий момент являются универсальные полуприцепы, например «ЧКЗ-Агро», которые могут оборудоваться дисками-разбрасывателями (рис. 3) [18]. А большой объем, от 20 до 50 м³, самих прицепов, позволяет вносить известковые удобрения в дозах, необходимых для проведения операции по раскислению почвы.



Рис. 3. Универсальный полуприцеп «ЧКЗ-Агро»
Fig. 3. Universal semi-trailer CHKZ-Agro

Распределители минеральных удобрений предназначены для транспортирования и поверхностного внесения твердых минеральных удобрений, известковых материалов и химических мелиорантов. Одним из примеров таких агрегатов является РУ-7000 (рис. 4).

Привод подающего транспортера осуществляется как от колеса машины, что обеспечивает синхронизацию подачи рабочего продукта от скорости движения машины, так и от вала отбора мощности (ВОМ) трактора. Предусмотрена ручная настройка машины на вид рабочего продукта и требуемую дозу внесения. РУ-7000 имеет механический привод (от ВОМ) распределяющих центробежных органов (тарелок) и гидравлический привод подающего транспортера от гидросистемы трактора.

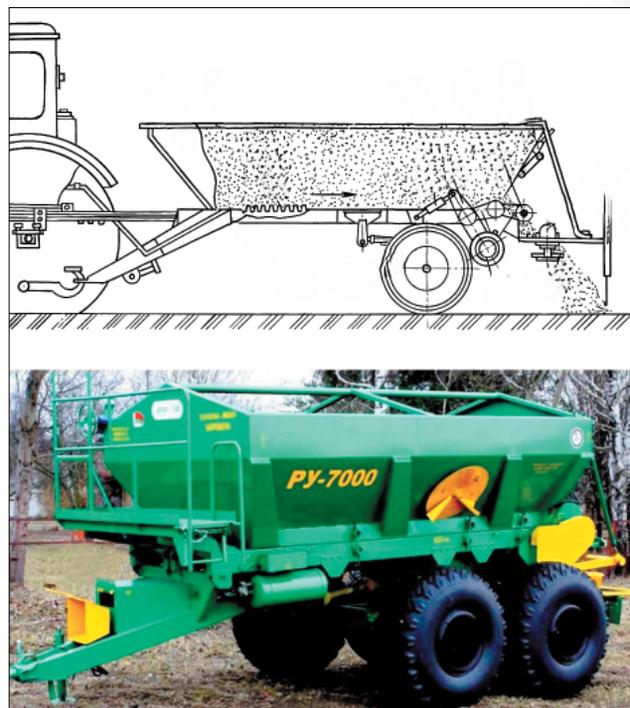


Рис. 4. Распределитель минеральных удобрений PY-7000
Fig. 4. Mineral fertilizer spreader RU-7000

Программирование и контроль дозы внесения осуществляется бортовым компьютером.

Выводы. За счет закисления почв урожайность возделываемых культур уменьшается на 50-70%. Известкование почв является главным методом для нейтрализации избыточной кислотности почв, повышения эффективности использования минеральных удобрений, создания оптимальных условий для жизнедеятельности почвенных микроорганизмов.

Отсутствие достаточного количества технических средств для внесения известковых материалов сдерживает полномасштабное проведение известкования почв. При том, что в нашей стране имеется достаточный природный ресурс таких материалов: ежегодный выход только карбонатных отходов составляет 20,7 млн т.

При известковании почв значительно возрастает эффективность внесения минеральных удобрений за счет повышения их усвояемости растениями. На сильнокислых почвах коэффициент использования азота в 1,4-2,7 раза ниже, фосфорных удобрений составляет 1,7-2,0% против 10-15% на почвах с благоприятной реакцией.

Доломитовая мука грубого помола эффективно снижает кислотность почвы. Для раскисления почвы от средне- до слабокислых значений (рН_{КCl} 5,3-5,6) необходимо вносить известковые материалы в дозах 4 т/га.

Использование сидератов способствует снижению имеющегося уровня рН и частично заменяет внесения минеральных удобрений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Осипов А.И. История и практические аспекты известкования кислых почв в России // *Агрохимический вестник*. 2019. N3. С. 28-36. DOI: 10.24411/0235-2516-2019-10038.
2. Стифеев А.И., Никитина О.В. Состояние пахотных земель Центрального Черноземья и основные направления воспроизводства их плодородия // *Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии*. 2022. N2. С. 30-35. EDN: MSJYEV.
3. Литвинович А.В. История известкования почв // *Агрофизика*. 2014. N2. С. 45-51. EDN: SEMCYJ.
4. Люри Д.И., Некрич А.С., Карелин Д.В. Изменение пахотных площадей в России в 1990-2015 гг. и почвенная эмиссия диоксида углерода // *Вестник Московского университета. Серия 5: География*. 2018. N3. С. 70-76. EDN: WDJVHN.
5. Дорохов А.С., Старостин И.А., Ещин А.В. Перспективы развития методов и технических средств защиты сельскохозяйственных растений // *Агроинженерия*. 2021. N1(101). С. 26-35. DOI: 10.26897/2687-1149-2021-1-26-35.
6. Сискевич Ю.И. Мониторинг кислотности сельхозугодий Липецкой области // *Плодородие*. 2007. N1. С. 4-5.
7. Лобачевский Я.П. Научное обеспечение приоритетных технологий агропромышленного комплекса Российской Федерации // *Вестник Российской академии наук*. 2024. Т. 94. N3. С. 275-282. DOI: 10.31857/S0869587324030102.
8. Агурова И.В., Сыщиков Д.В. Кислотность деградированных почв сельскохозяйственных угодий Донецкой Народной Республики // *Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение*. 2023. N3. С. 125-131. DOI: 10.55959/MSU0137-0944-17-2023-78-3-125-131.
9. Алдошин Н.В., Васильев А.С., Голубев В.В. Обоснование приемов обработки почвы при освоении залежных земель // *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. 2020. Т. 13. N1(64). С. 28-35. DOI: 10.17238/issn2071-2243.2020.1.28.
10. Яговенко Л.Л., Такунов И.П., Яговенко Г.Л. Влияние люпина на свойства почвы при его запашке на сидерацию // *Агрохимия*. 2003. N6. С. 71-80.
11. Косолапов В.М., Цыгуткин А.С., Алдошин Н.В., Лылин Н.А. Агрономические основы инженерного обеспечения биологизации земледелия // *Кормопроизводство*. 2022. N3. С. 41-47. DOI: 10.25685/krm.2022.3.2022.007.
12. Ценч Ю.С., Сидоров И.В. Генезис понятия «химизация сельского хозяйства» и его развитие в отечественной аграрной науке // *Технический сервис машин*. 2023. Т. 61. N4(153). С. 125-131. DOI: 10.22314/2618-8287-2023-61-4-125-131.
13. Несговорова Н.П., Савельев В.Г. Кислотность почв как фактор формирования видового состава фитоценозов некоторых охраняемых территорий Курганской области России // *Успехи современного естествознания*. 2022. N6. С. 35-40. DOI: 10.17513/use.37838.
14. Aldoshin N.V., Vasiliev A.S., Kudryavtsev A.V. et al. Improvement of forage lands in central non-black earth zone of Russia by using some integrated approaches. *Plant Science Today*. 2021. Vol. 8. N1. 9-15. DOI: 10.14719/pst.2021.8.1.827.
15. Чекмарев П.А., Лукин С.В. Мониторинг плодородия пахотных почв Центрально-Черноземных областей России // *Агрохимия*. 2013. N4. С. 11-22. EDN: PZDJEN.
16. Лобачевский Я.П., Алдошин Н.В. Технология и технические средства для реализации методов воспроизводства плодородия почвы // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. N2. С. 40-46. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-40-46.
17. Лобачевский Я.П., Алферов А.А. Актуальные исследования ученых Отделения сельскохозяйственных наук РАН // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2024. N2. С. 3-6. DOI: 10.31857/S2500262724020012.
18. Старовойтов С.И., Ценч Ю.С., Личман Г.И. Технические системы цифрового контроля качества обработки почвы // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. N1. С. 16-21. DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-1-16-21.
19. Коротченя В.М., Личман Г.И. Приоритеты развития почвообрабатывающих технологий // *Техника и оборудование для села*. 2023. N2(308). С. 2-6. DOI: 10.33267/2072-9642-2023-2-2-6.

REFERENCES

1. Osipov A.I. History and practical aspects of acid soils liming in Russia. *Agrochemical Herald*. 2019. N3. 28-36 (In Russian). DOI: 10.24411/0235-2516-2019-10038.
2. Stifeev A.I., Nikitina O.V. The state of arable lands of the Central Chernozem region and the main directions of reproduction of their fertility. *Vestnik KGSFA*. 2022. N2. 30-35 (In Russian). EDN: MSJYEV.
3. Litvinovich A.V. History of soil liming. *Agrophysica*. 2014. N2. 45-51 (In Russian). EDN: SEMCYJ.
4. Lyuri D.I., Nekrich A.S., Karelin D.V. Cropland dynamics in Russia in 1990–2015 and soil emission of carbon dioxide. *Lomonosov Geography Journal. Ser. Geography*. 2018. N3. 70-76 (In Russian). EDN: WDJVHN.
5. Dorokhov A.S., Starostin I.A., Eschin A.V. Development prospects for methods and technical means of farm crop protection. *Agricultural Engineering*. 2021. N1. 26-35 (In Russian). DOI: 10.26897/2687-1149-2021-1-26-35.
6. Siskevich Yu.I. Monitoring the acidity of farmland in the Lipetsk region. *Plodorodie*. 2007. N1. 4-5 (In Russian).
7. Lobachevsky Ya.P. Scientific support of priority technologies agro-industrial complex of the Russian Federation. *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2024. Vol. 94.

- N3. 275-282 (In Russian). DOI: 10.31857/S0869587324030102.
8. Agurova I.V., Syshchykov D.V. Acidity of degraded soils of agricultural lands of the Donetsk Peoples Republic. *Lomonosov Soil Science Journal*. 2023. Vol. 78. N3. 125-131 (In Russian). DOI:10.55959/MSU0137-0944-17-2023-78-3-125-131.
 9. Aldoshin N.V., Vasiliev A.S., Golubev V.V. Justification of tillage methods in the development of fallow lands. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2020. Vol. 13. N1(64). 28-35 (In Russian). DOI: 10.17238/issn2071-2243.2020.1.28.
 10. Yagovenko L.L., Takunov I.P., Yagovenko G.L. The effect of lupine on soil properties during its plowing for sideration. *Agrohimia* 2003. N6. C. 71-80.
 11. Kosolapov V.M., Tsygutkin A.S., Aldoshin N.V., Lylin N.A. Mechanized agronomy as means for arable farming biologization. *Kormoproizvodstvo*. 2022. N3. 41-47 (In Russian). DOI: 10.25685/krm.2022.3.2022.007.
 12. Tsench Yu.S., Sidorov I.V. Chemization of agriculture as a concept in Russian agricultural sciences, its genesis and development. *Machinery Technical Service*. 2023. Vol. 61. N4(153). 125-131 (In Russian). DOI:10.22314/2618-8287-2023-61-4-125-131.
 13. Nesgovorova N.P., Savelyev V.G. Soil acidity as a factor in the formation of the species composition of phytocenoses in some protected areas of the Kurgan Region of Russia. *Advances in Current Natural Sciences*. 2022. N6. 35-40 (In Russian). DOI: 10.17513/use.37838.
 14. Aldoshin N.V., Vasiliev A.S., Kudryavtsev A.V. et al. Improvement of forage lands in central non-black earth zone of Russia by using some integrated approaches. *Plant Science Today*. 2021. Vol. 8. N1. 9-15 (In Russian). DOI: 10.14719/pst.2021.8.1.827.
 15. Chekmarev P.A., Lukin S.V. Monitoring of fertility of arable soils in the Central Chernozemic Regions of Russia. *Agrohimia*. 2013. N4. 11-22 (In Russian). EDN: PZDJEN.
 16. Lobachevskiy Ya.P., Aldoshin N.V. Technology and technical means for the implementation of reproduction methods for soil fertility. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N2. C. 40-46 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-40-46.
 17. Lobachevskiy Ya.P., Alferov A.A. Current research by scientists of the department for agricultural science of the Russian academy of sciences. *Russian Agricultural Sciences*. 2024. N2. 3-6 (In Russian). DOI: 10.31857/S2500262724020012.
 18. Starovoytov S.I., Tsench Yu.S., Korotchenya V.M., Lichman G.I. Technical systems for digital soil quality control. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2020. Vol. 14. N1. 16-21 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-1-16-21.
 19. Korotchenya V.M., Lichman G.I. Priorities for the development of tillage technologies. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2023. N2(308). 2-6 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2023-2-2-6.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Алдошин Н.В. – общее руководство исследованием, концептуализация, методология статьи, редактирование рукописи;

Золотарев А.С. – проведение исследований, создание черновика рукописи;

Квас С.А. – проведение исследований, окончательная версия рукописи.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Aldoshin N.V. – overall supervision of the research, conceptualization, development of the article methodology, and manuscript editing;

Zolotarev A.S. – conducting the research and drafting the manuscript;

Kvas S.A. – conducting the research and preparing the final version of the manuscript.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию

Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on

The paper was accepted for publication on

29.09.2025

14.11.2025



Роботизированная сеялка зерновых, зернобобовых и других культур для первого этапа работ селекции

Андрей Сергеевич Чулков,
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: andrei.chulkov@mail.ru;

Леонид Юрьевич Юферов,
доктор технических наук, главный научный сотрудник,
e-mail: leouf@ya.ru;
Олег Владимирович Масчев,
младший научный сотрудник,
e-mail: oleg.maschev@yandex.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. В связи с развитием техники для посева в целях повышения качества и снижения трудоемкости производственных операций первого этапа работ необходимо совершенствование селекционной сеялки в направлении роботизации процесса посева. (*Цель исследования*) Разработать конструкцию и алгоритм работы роботизированной сеялки для зерновых, зернобобовых и других культур на первом этапе работ селекции и обосновать параметры подачи семян при посеве. (*Материалы и методы*) Схема сеялки разработана в соответствии с требованиями отраслевой нормативной документации, обоснованы конструктивно-технологические параметры подачи семян при посеве при помощи роботизированного кассетного загрузочного устройства карусельного типа. (*Результаты и обсуждение*) Отметили некоторые конструктивные особенности селекционных сеялок для первого этапа работ при помощи роботизированного кассетного загрузочного устройства карусельного типа. Составлены схема и алгоритм работы сеялки, формулы скорости подачи кассет с семенами при многорядном посеве и скорости перемещения заслонки распределителя при однорядном посеве. Выявлен новый тип высевающего аппарата распределительного типа с дозирующей заслонкой. Разработан экспериментальный образец сеялки СССР-1 и проведены лабораторные испытания посева семян яровой пшеницы в 6 рядов с междурядьями 15 см и расстоянием между семенами 20 см на делянке шириной 1 м. (*Выводы*) При рабочей скорости движения сеялки 1 километр в час и расстоянии между семенами в одном рядке от 0,1 до 0,3 метра скорость перемещения кассет при многорядном посеве составила от 0,056 до 0,168 метра в секунду, при однорядном посеве скорость перемещения заслонки распределителя варьируется от 0,028 до 0,084 метра в секунду. Отклонение от нормы высева составили 1 процент, коэффициент вариации расстояний между семенами в одном рядке не превышает 5 процентов. Роботизированная селекционная сеялка обеспечит контролируемое качество выполнения посева зерновых и других культур на первом этапе работ в селекции и семеноводстве, создаст предпосылки для повышения производительности и снижения трудоемкости основной операции посева.
Ключевые слова: зерновые и зернобобовых культуры, посев, селекционная кассетная сеялка, роботизированное кассетное загрузочное устройство.

■ **Для цитирования:** Чулков А.С., Юферов Л.Ю., Масчев О.В. Роботизированная сеялка зерновых, зернобобовых и других культур для первого этапа работ селекции // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2025. Т. 19. №4. 42-48. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-4-42-48. EDN: VRWLYM.

Scientific article

Robotic Seeder for Cereals, Legumes and other Crops in Early-stage Breeding Trials

Andrey S. Chulkov,
Ph.D.(Eng.), leading researcher,
e-mail: andrei.chulkov@mail.ru;

Leonid Yu. Yuferev,
Dr.Sc.(Eng.), chief researcher,
e-mail: leouf@ya.ru;
Oleg V. Maschev,
junior researcher, e-mail: oleg.maschev@yandex.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. The advancement of seeding technologies aimed at improving sowing quality and reducing labor intensity has underscored the need to modernize selective seeders through the robotic integration. (*Research purpose*) To develop the design

and operational algorithm of a robotic seeder for cereals, leguminous, and other crops for early-stage breeding trials, and to substantiate the seed feeding parameters during sowing. (*Materials and methods*) A seeder schematic was developed in accordance with current regulatory standards, and the structural and technological parameters of seed feeding using a robotic carousel-type cassette loading device were substantiated. (*Results and discussion*) The study identified key design features of selective seeders intended for early-stage breeding trials, specifically those incorporating a robotic carousel-type cassette loading device. An operational scheme and control algorithm for the seeder were developed, accompanied by formulas for calculating the cassette feed rate in multi-row sowing and the distributor gate opening speed during single-row sowing. A new distributor-type sowing mechanism equipped with a metering gate was proposed. A prototype seeder, SSSR 1, was constructed. Laboratory tests were conducted for six-row sowing of spring wheat, using a 15-centimeter row spacing and 20-centimeter intra-row seed spacing on a 1-meter-wide plot. (*Conclusions*) At a working speed of 1 kilometer per hour and intra-row seed spacing ranging from 0.1 to 0.3 meters, the cassette feed rate in multi-row sowing ranged from 0.056 to 0.168 meters per second. For single-row sowing, the distributor gate opening speed ranged from 0.028 to 0.084 meters per second. The sowing deviation was 1 percent, and the coefficient of variation for intra-row seed spacing did not exceed 5 percent. The robotic selective seeder ensures controlled sowing quality for cereals and other crops during early-stage breeding trials and seed production. The implementation of the developed seeder creates the prerequisites for increasing productivity and reducing the labor intensity of the core sowing operation.

Keywords: cereals and leguminous crops, sowing, selective cassette seeder, robotic carousel-type cassette loading device.

■ **For citation:** Chulkov A.S., Yuferev L.Yu., Mashev O.V. Robotic seeder for cereals, legumes, and other crops in early-stage breeding trials. *Agricultural Machinery and Technology*. 2025. Vol. 19. N4. 42-48 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-4-42-48. EDN: VRWLYM.

Разработка и применение новых селекционных сеялок с роботизацией технологического процесса должны быть направлены на более качественное выполнение операций посева зерновых и других культур в селекционных и семеноводческих питомниках [1], содействовать уменьшению трудоемкости и росту производительности при посеве участков [2, 3]. Для посева на первом этапе селекции, сортоиспытания и первичного семеноводства зерновых, зернобобовых и других культур до сих пор применяются ручной труд или ручные селекционные сеялки ССК-1 и РСС-1 [4-6].

Цель исследования: разработать конструкцию и алгоритм действия роботизированной селекционной сеялки зерновых, зернобобовых и других культур на первом этапе работ селекции и обосновать параметры подачи семян при посеве.

Материалы и методы. Разработана схема роботизированной селекционной сеялки для первого этапа работ в соответствии с ГОСТ Р 60.0.0.4-2023/ИСО 8373:2021 «Роботы и робототехнические устройства. Термины и определения». Обоснованы конструктивно-технологические параметры сеялки с роботизированным кассетным загрузочным устройством (РКЗУ) в соответствии ОСТ 46-73-78. На первом этапе селекции на одной делянке длиной от 0,1 до 0,3 м должен быть произведен однозерновой посев шириной до 1,0 м при расстоянии между соседними рядами от 0,05 до 0,2 м.

В связи с развитием роботизации в целях повышения качества посева и снижения трудоемкости работ возникла необходимость совершенствования сеялки для первого этапа селекционных работ [7, 8]. Известно роботизированное кассетное загрузочное

устройство карусельного типа селекционной сеялки (Патент RU 2806909) для подачи материала к порционным высевальным аппаратам.

Предложено усовершенствовать РКЗУ карусельного типа [9] для использования на первом этапе селекционных работ при подаче семян зерновых и зернобобовых культур (Патент RU 2848548). Схема разрабатываемой селекционной сеялки представлена на *рисунке 1*.

На раме 1 сеялки смонтированы опорно-приводные колеса 2, двухдисковый сошник 3 с заделывающим устройством 4, семяпровод 5, сница 6 и роботизированное кассетное загрузочное устройство карусельного типа. РКЗУ выполнено в соответствии с ГОСТ Р 60.0.0.4-2023/ИСО 8373:2012 и представляет собой стационарный промышленный (сельскохозяйственный) робот. Звенья манипулятора РКЗУ работают с двумя степенями подвижности: при поступательном движении для перемещения кассет 7 с семенным материалом в направлении высевального аппарата, состоящего из распределителя 8 с выгрузными отверстиями и дозирующей заслонкой 9 при вращательном движении для перемещения блоков кассет 11.

Ячейки кассет 7 с пазами для семенного материала последовательно нанизаны на направляющую пластину 10 и образуют блок кассет 11.

На раме сеялки расположены центральная неподвижная платформа 12 и внешняя подвижная 13 с отверстиями для выпадения семенного материала. Актуатор 14 установлен на центральной неподвижной платформе на противоположной от распределителя 8 стороне относительно размещенного в рабочей зоне 15 блока кассет.

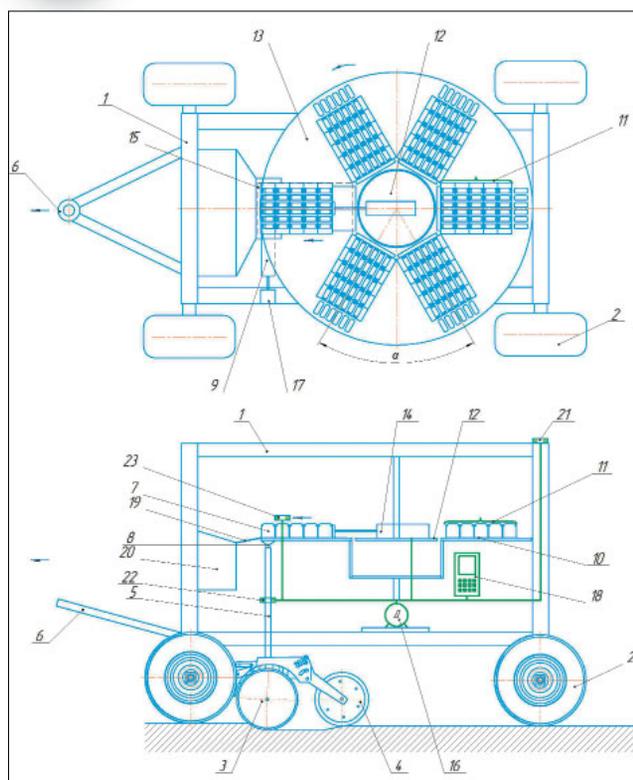


Рис. 1. Схема роботизированной сеялки с роботизированным кассетным загрузочным устройством карусельного типа для первого этапа работ селекции: 1 – рама; 2 – опорно-приводное колесо; 3 – сошник; 4 – заделывающе-прикатывающее устройство; 5 – семяпровод; 6 – сцепка; 7 – кассета с ячейками для высеваемого материала; 8 – распределитель; 9 – заслонка; 10 – направляющая пластина; 11 – блок кассет; 12 – центральная неподвижная платформа; 13 – внешняя подвижная платформа; 14 – актуатор; 15 – рабочая зона перемещения кассет; 16 – шаговый электродвигатель привода высевочного аппарата; 17 – дополнительный актуатор; 18 – блок управления; 19 – контейнер для сбора пустых кассет; 20 – наклонный лоток для спуска пустых кассет; 21 – система навигации; 22 – датчик пролета семян; 23 – датчик положения кассет

Fig. 1. Diagram of a robotic seeder with a robotic carousel-type cassette loading device for early-stage breeding trials: 1 – frame; 2 – support-drive wheel; 3 – opener; 4 – covering and press-wheel unit; 5 – seed tube; 6 – hitch; 7 – cassette with cells for sowing material; 8 – distributor; 9 – shutter; 10 – guide plate; 11 – cassette block; 12 – central stationary platform; 13 – outer movable platform; 14 – actuator; 15 – working area of cassette movement; 16 – stepper motor of the seeding unit drive; 17 – additional actuator; 18 – control unit; 19 – container for collecting empty cassettes; 20 – inclined chute for empty cassette discharge; 21 – navigation system; 22 – seed passage sensor; 23 – cassette position sensor

Рабочая зона находится в месте выдвижения штока актуатора и охватывает один из блоков кас-

сет, а также отверстия подвижной платформы 1. На внешней поверхности подвижной платформы, которая приводится в движение шаговым электродвигателем 16, равномерно по окружности с шагом α установлены и зафиксированы блоки кассет.

В рабочую зону 15 входит высевочный аппарат в виде распределителя 8 с заслонкой 9, приводимой в действие дополнительным актуатором 17. Распределитель 8 установлен под подвижной платформой 13 в рабочей зоне, а его выгрузные отверстия и отверстия подвижной платформы выполнены совмещаемыми.

Актуаторы 14, 17 и электродвигатель 16 связаны с блоком управления 18, запрограммированным согласно плану посева делянок.

Наклонный лоток 20 для схода пустых кассет в контейнер 19 размещен на раме сеялки за распределителем 8. Блок управления обеспечивает согласование подачи семенного материала манипулятором РКЗУ со скоростью движения сеялки в соответствии с данными, поступающими от системы навигации 21, которая находится на раме или в кабине трактора. Подача семенного материала в семяпровод 5 отслеживается с помощью размещенного на семяпроводе датчика пролета 22 семенного материала. Подача кассет в рабочей зоне 15 контролируется датчиком положения кассет 23.

Роботизированная сеялка с РКЗУ карусельного типа при однорядном посеве работает в соответствии с алгоритмом (рис. 2). При многорядном посеве операция передвижения заслонки распределителя высевочного аппарата и вспомогательная операция возврата штока актуатора распределителя отсутствуют.

Сеялку агрегируют с трактором и подводят к началу делянок. Оператор-тракторист включает блок управления 18, вводит параметры делянки и способ посева (однорядный или многорядный). РКЗУ совершает вспомогательную операцию, при которой актуатор 14 перемещает кассеты в направлении распределителя. При этом семенной материал из ячеек первой в очереди кассеты блока, расположенного в рабочей зоне, выпадает в совмещенные между собой отверстия подвижной платформы и распределителя. Пустая кассета сходит по наклонному лотку в контейнер.

Сеялка начинает движение по селекционному участку. При однорядном посеве выгрузные отверстия высевочного аппарата последовательно открываются заслонкой распределителя, которая приводится в действие актуатором 17 и контролируется через блок управления с учетом данных системы навигации.

Сеялка по сигналу останавливается, по команде с блока управления актуатор 17 выдвигает шток и заслонка закрывает выгрузные отверстия распре-

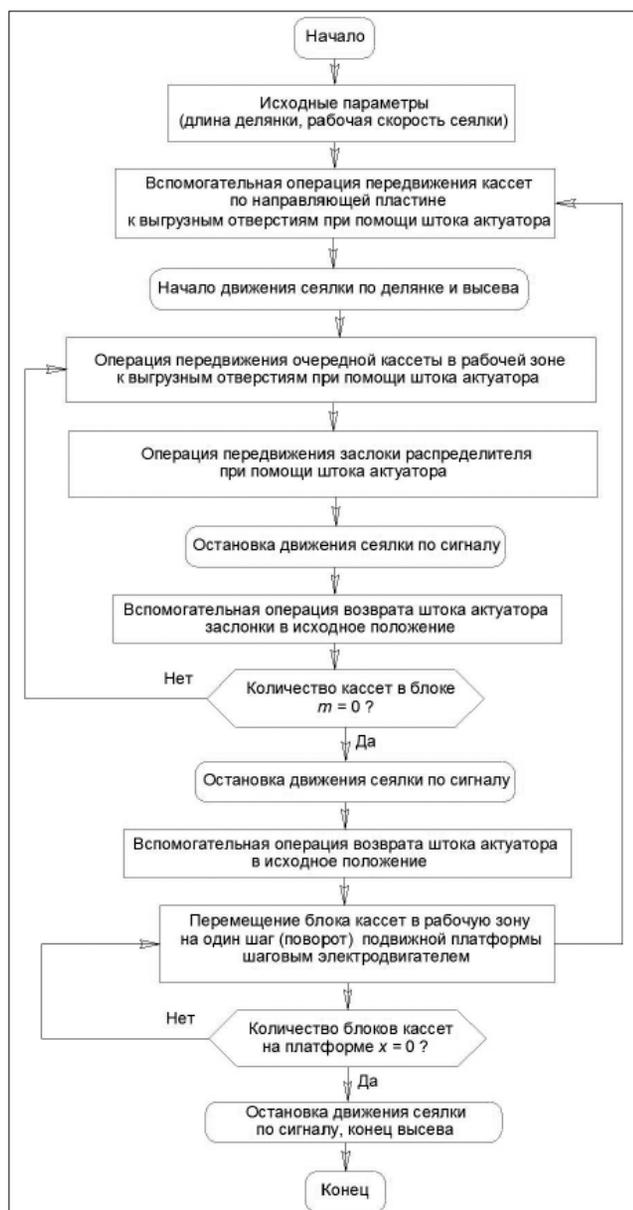


Рис. 2. Алгоритм работы сеялки с РКЗУ карусельного типа при однорядном посеве

Fig. 2. Operating algorithm of a seeder equipped with a robotic carousel-type cassette loading device for single-row sowing

делителя высевающего аппарата. После этого шток актуатора 14 выдвигается и подает очередную кассету 7 к отверстиям подвижной платформы 13. Процесс повторяется до момента, когда закончатся все кассеты блока, установленного в рабочей зоне.

При многорядном посеве заслонка распределителя высевающего аппарата находится в открытом положении. С помощью системы навигации, отслеживающей перемещение сеялки по селекционному участку, в соответствии со скоростью движения сеялки через блок управления регулируется скорость перемещения кассет по направляющей пластине 10 в рабочей зоне. Шток актуатора 14 выдвигается и

последовательно под контролем блока управления перемещает по направляющей пластине 10 кассеты с семенным материалом к распределителю.

Семенной материал при однорядном и многорядном посеве подается через совмещенные отверстия по семяпроводу 5 в сошник 3 и далее в борозду. После схода с направляющей пластины 10 всех кассет срабатывает датчик положения кассет 23, подается сигнал, и сеялка останавливается. По команде блока управления шток актуатора 14 возвращается в исходное положение.

Скорость подачи кассет 7 с семенами для многорядной сеялки [10] зависит от расстояния между семенами в одном рядке и от скорости движения сеялки:

$$V_{ПК} = B \cdot v_c / L_c, \text{ м/с}, \quad (1)$$

где B – ширина кассеты, м; v_c – рабочая скорость движения сеялки м/с; L_c – расстояние между соседними семенами в одном рядке, м.

Для сеялки первого этапа работ в каждую кассету помещают одно семя. Ширина кассеты должна быть минимальной, принимаем $B = 0,01$ м; рабочая скорость на первом этапе работ принимаем $v_c = 0,28$ м/с (1 км/ч); расстояние между соседними семенами в одном рядке $L_c = 0,1–0,3$ м. Исходя из этих данных получены зависимости скорости подачи кассет от расстояния между семенами в одном рядке (рис. 3).

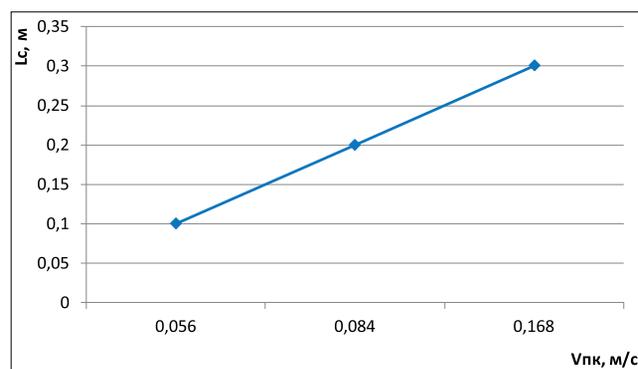


Рис. 3. Зависимость скорости подачи кассет с семенами для многорядной сеялки от расстояний между семенами в одном рядке при скорости движения сеялки 1 км/ч
Fig. 3. Dependency of the cassette feeding rate in a multi-row seeder on the intra-row seed spacing, and forward speed of the seeder 1 km per hour

При однорядном посеве скорость подачи кассет равна максимальной скорости выдвижения штока актуатора 14, а скорость подачи заслонки распределителя высевающего аппарата:

$$V_p = c \cdot v_c / L_c, \text{ м/с}, \quad (2)$$

где c – ширина ячейки кассеты, для кассеты с шестью ячейками, $c = 0,03$ м.

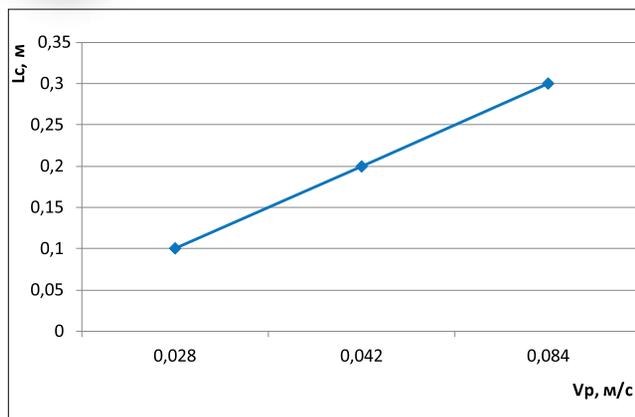


Рис. 4. Зависимость скорости открытия заслонки распределителя для однорядной сеялки от расстояний между семенами в одном рядке при скорости движения сеялки 1 км/ч

Fig. 4. Dependency of the distributor gate opening speed in a single-row seeder on the intra-row seed spacing and forward speed of the seeder 1 km per hour

Зависимость скорости открытия заслонки от расстояния между семенами в одном рядке показана на рисунке 4.

Для подачи нового блока кассет шаговый электродвигатель 16 поворачивает внешнюю подвижную платформу 13 на угол α , который зависит от количества блоков с кассетами, установленных на подвижной платформе 13. При этом следующий кассетный блок перемещается в рабочую зону 15 [11].

Операции подачи кассет и перемещения кассетных блоков повторяются. После освобождения всех кассет от семенного материала через блок управления подается сигнал об окончании работы сеялки.

Если семенной материал не прошел через семяпровод 5, то срабатывает датчик пролета 22, через блок управления 18 передается сигнал остановки сеялки до выяснения и устранения причины.

Подачу кассет к распределителю в рабочей зоне контролирует датчик положения кассет 23. В случае застревания кассет этот датчик через блок

управления подает звуковой сигнал оператору-трактористу, который останавливает работу сеялки и устраняет причину неисправности.

Из распределителя высевающего аппарата семена равномерно перемещаются в семяпровод и далее в борозду, образованную двухдисковым сошником. Задельвающе-выравнивающее устройство в виде прикатывающего катка засыпает рыхлой почвой посевной материал в борозде, поверхность почвы разравнивается и легко уплотняется.

В ФГБНУ ФНАЦ ВИМ по техническому заданию на основе патента RU 2848548 изготовлен экспериментальный образец роботизированной селекционной сеялки для первого этапа работ СССР-1 с зерновыми и другими культурами на базе самоходного шасси типа Т-16 (рис. 5). Технические характеристики разработанной сеялки СССР-1 представлены в таблице.



Рис. 5. Роботизированная селекционная сеялка СССР-1 для первого этапа работ

Fig. 5. Robotic selective seeder for early-stage breeding trials, SSSR-1

Технические характеристики сеялки СССР-1 / Technical parameters of the SSSR-1 seeder	
Параметр	Значение
Назначение сеялки	Для посева зерновых и зернобобовых культур на селекционных делянках первого этапа работ
Тип сеялки	Селекционная на базе самоходного шасси типа Т-16 с роботизированным кассетным загрузочным устройством (РКЗУ)
Количество рядов для посева	6
Количество сошников двухдисковых	6
Количество РКЗУ карусельного типа	1
Привод устройств	РКЗУ карусельного типа – роботизированное устройство от электропривода; подъем и опускание сошников – гидропривод
Габаритные размеры, мм	3900 × 2000 × 2500
Масса устройства без загрузки семенным материалом, кг	2153

В результате лабораторных испытаний экспериментального образца были проверены параметры однозернового пунктирного посева деланки шириной 1 м в шесть рядов семян яровой пшеницы с междурядьями 15 см и расстоянием между семенами 20 см. Отклонение от нормы высева составило 1%, коэффициент вариации расстояний между семенами в одном рядке не выше 5%.

Роботизированная селекционная сеялка создаст предпосылки для повышения производительности основной операции посева и снижения трудоемкости на первом этапе работ селекции зерновых, зернобобовых, крупяных, некоторых масличных и пропашных сельскохозяйственных культур.

Выводы. Разработана конструкционная схема и алгоритм операций роботизированной селекционной сеялки для первого этапа работ. Роботизация обеспечивается интеграцией кассетного загрузочного устройства карусельного типа, которое подает семена в высевающий аппарат.

Предложен новый тип высевающего аппарата распределительного типа с дозирующей заслонкой.

Посев осуществляется под контролем системы навигации, отслеживающей перемещение сеялки по селекционному участку, и через блок управле-

ния регулируется скорость перемещения кассет.

Приведены формулы скорости подачи кассет с семенами при многорядном посеве и скорости перемещения заслонки распределителя при однорядном посеве. При рабочей скорости движения сеялки 1 км/ч и расстоянии между семенами в одном рядке от 0,1 до 0,3 м скорость перемещения кассет при многорядном посеве составила от 0,056 до 0,168 м/с. При однорядном посеве скорость перемещения заслонки распределителя высевающего аппарата варьируется от 0,028 до 0,084 м/с.

Разработан экспериментальный образец сеялки СССР-1 и проведены лабораторные испытания посева семян яровой пшеницы в шесть рядов с междурядьями 15 см и расстоянием между семенами 20 см на деланке шириной 1 м. Отклонение от нормы высева составило 1%, коэффициент вариации расстояний между семенами в одном рядке не превышает 5%.

Роботизированная сеялка обеспечит контроль качества выполнения посева зерновых и других культур на первом этапе работ в селекции и семеноводстве, создаст предпосылки для повышения производительности выполнения основной операции посева и снижения трудоемкости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Ценч Ю.С. и др. О синтезе роботизированного сельскохозяйственного мобильного агрегата // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2019. N4. С. 63-68. DOI: 10.30850/vrsm/2019/4/63-68.
- Ахалая Б.Х., Ценч Ю.С., Миронова А.В. Разработка и исследование дозирующей системы высевающего устройства пневматической сеялки // Техника и оборудование для села. 2021. N6 (288). С. 8-11. DOI: 10.33267/2072-9642-2021-6-8-11.
- Чаплыгин М.Е., Ценч Ю.С., Подзоров А.В. Развитие конструкций сеялок и технологий посева семян в ленте // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2025. Т. 19. N1. С. 103-110. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-1-103-110.
- Московский М.Н., Смирнова Ю.Л. Разработка интерфейса и программного обеспечения для реализации системы автоматического высева // Инженерный вестник Дона. 2019. N7(58). С. 17. EDN: VSCJBT.
- Ахалая Б.Х., Ценч Ю.С. Инновационный пневматический высевающий аппарат для совмещенного и пунктирного посева семян // Технический сервис машин. 2025. Т. 63. N2. С. 80-85. DOI: 10.22314/2618-8287-2025-63-2-80-85.
- Жалнин Э.В. Семеноводство России – приоритет импортозамещения // Сельский механизатор. 2016. N3. С. 2-3. EDN: VSLREX.
- Ценч Ю.С., Несмиян А.Ю., Хомутова Н.С. История развития конструкции высевающих аппаратов зерновых сеялок // Вопросы истории естествознания и техники. 2020. Т. 41. N1. С. 102-117. DOI: 10.31857/S020596060008429-3.
- Чулков А.С., Шайхов М.М., Чаплыгин М.Е., Текушев А.Х. Кассетные загрузочные устройства для высевающих аппаратов селекционных сеялок // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2023. Т. 70. N2(51). С. 74-81. DOI: 10.22314/2658-4859-2023-70-2-74-81.
- Cheng X.P., Li H.W., He J. et al. Optimization of operating parameters of seeding device in plot drill with seeding control system. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2021. N14(3). 72-80. DOI: 10.25165/j.ijabe.20211403.6218.
- Чулков А.С., Шайхов М.М., Текушев А.Х. Селекционная сеялка на базе самоходного шасси с роботизированным кассетным загрузочным устройством // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2025. Т. 19. N1. С. 49-54. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-1-49-54.
- Чулков А.С., Чаплыгин М.Е., Свиридов А.С., Степанов К.А. Определение параметров перемещения блока кассет в роботизированном кассетном загрузочном устройстве селекционной сеялки // Таврический вестник аграрной науки. 2024. N4(40). С. 240-248. DOI: 10.5281/zenodo.14184845.

REFERENCES

1. Izmaylov A.Yu., Lobachevsky Ya.P., Tsench Yu.S. et al. About Synthesis of Robotic Agriculture Mobile Machine. *Vestnik of the Russian Agricultural Science*. 2019. N4. 63-68 (In Russian). DOI: 10.30850/vrsn/2019/4/63-68.
2. Akhalaia B.Kh., Tsench Yu.S., Mironova A.V. Development and research of a pneumatic seed drill seedmeters unit. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2021. N6 (288). 8-11 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2021-6-8-11.
3. Chaplygin M.E., Tsench Yu.S., Podzorov A.V. Development of seeder designs and technologies for sowing seeds in a tape. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N1. 103-110 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-1-103-110.
4. Moskovskiy M.N., Litvinov M.A., Smirnova Ju.L. Development of an interface and software for the implementation of an automatic seeding system. *Engineering Journal of Don*. 2019. N7(58). 17 (In Russian). EDN: VSCJBT.
5. Akhalaya B.Kh., Tsench Yu.S. Innovative pneumatic seeding machine for combined and dotted-row sowing. *Machinery Technical Service*. 2025. Vol. 63. N2. 80-85 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2025-63-2-80-85.
6. Zhalnin E.V. Russian seed production – the priority of import substitution. *Selskiy Mehanizator*. 2016. N3. 2-3 (In Russian). EDN: VSLREKS.
7. Tsench Yu.S., Nesmiyan A.Yu., Khomutova N.S. The History of development of seed-feeding devices on grain drills. *Studies in the History of Science and Technology*. 2020. Vol. 41. N1. 102-117 (In Russian). DOI: 10.31857/S020596060008429-3.
8. Chulkov A.S., Shaykhov M.M., Chaplygin M.E., Tekushev A.Kh. Cassette loading units for hanging devices of breeding seeders. *Electrical Engineering and Electrical Equipment in Agriculture*. 2023. Vol. 70. N2(51). 74-81 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2023-70-2-74-81.
9. Cheng X.P., Li H.W., He J. et al. Optimization of operating parameters of seeding device in plot drill with seeding control system. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2021. N14(3). 72-80 (In English). DOI: 10.25165/j.ijabe.20211403.6218.
10. Chulkov A.S., Shaykhov M.M., Tekushev A.Kh. Selection seeder with a robotic cassette loading device mounted on self-propelled chassis. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N1. 49-54 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-1-49-54.
11. Chulkov A.S., Chaplygin M.E., Sviridov A.S., Stepanov K.A. Determining the parameters for moving a cassette block in a robotic cassette loading device of a selection seeder. *Taurida Herald of the Agrarian Sciences*. 2024. N4(40). 240-248 (In Russian). DOI: 10.5281/zenodo.14184845.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Чулков А.С. – формулирование основных целей и задач исследования, подготовка текста, визуализация материалов, формирование общих выводов, доработка статьи, анализ литературных источников;
 Юфев Л.Ю. – формулирование основных целей и задач исследования, формирование общих выводов;
 Масчев О.В. – доработка и оформление текста, визуализация материалов, анализ литературных источников.
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Chulkov A.S. – formulation of the main goals and objectives of the research, preparation of the text, visualization of materials, formation of general conclusions, revision of the article, analysis of literary sources;
 Yuferev L.Yu. – formulation of the main goals and objectives of the study, the formation of general conclusions;
 Mashev O.V. – revision of the text and design of materials, visualization of materials, analysis of literary sources.
The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию
 Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on
 The paper was accepted for publication on

14.09.2025
 25.11.2025

EDN: VWQHJC

DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-4-49-56



Научная статья

УДК 621.43.00:681.518/631.348



Применение БПЛА для мониторинга и ухода за посевами зерновых культур

Виктор Валентинович Альт^{1,2},
доктор технических наук, профессор,
академик Российской академии наук,
e-mail: victoryalt@yandex.ru;

Алексей Алексеевич Солошенко^{1,2},
младший научный сотрудник,
e-mail: alex.typeface@gmail.com;

Светлана Павловна Исакова¹,
старший научный сотрудник,
e-mail: isakova.s.p@yandex.ru;

Олег Федорович Савченко¹,
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: sof-oleg46@yandex.ru;

Олег Владимирович Елкин¹,
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: Oleg348@yandex.ru

¹Сибирский федеральный научный центр агробιοтехнологий Российской академии наук, Краснообск, Новосибирская область, Российская Федерация;

²Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Российская Федерация

Реферат. Отметим, что традиционные методы наблюдения за посевами относятся к трудоемким, затратным по времени и стоимости, а применение спутниковых снимков ограничивается погодными условиями, низким разрешением и большим интервалом между съемками. Использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) позволяет оперативно проводить мониторинг, своевременно обнаруживать отклонения и нарушения в развитии растений. *(Цель исследования)* Разработать информационную модель оперативного мониторинга с применением БПЛА и поддержки принятия решений. *(Материалы и методы)* К ключевым операциям ухода за посевами относятся дифференцированное опрыскивание с учетом карты обрабатываемых зон, точечное и зональное внесение удобрений по значениям индексов $NDVI/NDRE$, выявление болезней и вредителей, а также прогнозирование урожайности на основе статистической обработки временных рядов. Проведен системный и контент-анализ существующих материалов. Учитывая значительный объем и разнообразие данных, получаемых с БПЛА, особенно при производстве зерновых культур, обосновали выбор метода информационного моделирования. *(Результаты и обсуждение)* Выделены преимущества и недостатки применения БПЛА в сельском хозяйстве. Показали, что большой объем разнообразной информации с БПЛА необходимо собирать, систематизировать и качественно обрабатывать. Предложена схема информационной модели оперативного мониторинга посевов и поддержки принятия решений в точном земледелии на основе данных с БПЛА. В схеме предусмотрены блоки получения и предварительной обработки данных, вычислительный модуль для выполнения математического анализа с применением методов моделирования, машинного обучения и экспертной системы для выдачи рекомендаций по проведению агротехнических мероприятий. *(Выводы)* Обосновали, что внедрение БПЛА при грамотной организации процесса позволит снизить затраты на ресурсы топлива, воды, удобрений и пестицидов. Кроме этого, применение БПЛА будет способствовать повышению урожайности и эффективности использования трудовых ресурсов за счет точного мониторинга, автоматизации и оптимизации агротехнических мероприятий.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, мониторинг, получение и обработка данных, информационная модель, растениеводство, уход за посевами.

■ **Для цитирования:** Альт В.В., Солошенко А.А., Исакова С.П., Савченко О.Ф., Елкин О.В. Применение БПЛА для мониторинга и ухода за посевами зерновых культур // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2025. Т. 19. №4. С. 49-56. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-4-49-56. EDN: VWQHJC.

Scientific article

Use of UAVs in Agriculture for Monitoring and Management of Cereal Crops

Viktor V. Alt^{1,2},
Dr.Sc.(Eng.), professor,
member of the Russian Academy of Sciences,
e-mail: victoryalt@yandex.ru;

Aleksei A. Soloshenko^{1,2},
junior researcher,
e-mail: alex.typeface@gmail.com;

Svetlana P. Isakova¹,
senior researcher,
e-mail: isakova.s.p@yandex.ru;

Oleg F. Savchenko¹,
Ph.D.(Eng.), leading researcher,
e-mail: sof-oleg46@yandex.ru;

Oleg V. Elkin¹,
Ph.D.(Eng.), leading researcher,
e-mail: Oleg348@yandex.ru

¹Siberian Federal Scientific Centre of Agro Biotechnologies of the Russian Academy of Sciences, Krasnoobsk, Novosibirsk region, Russian Federation;

²Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

Abstract. Traditional crop monitoring methods are labor-intensive, time-consuming, and costly, while satellite imagery is constrained by dependence on weather conditions, low spatial resolution, and infrequent revisit times. In contrast, unmanned aerial vehicles (UAVs) offer rapid, high-resolution monitoring that enables the timely detection of anomalies and disruptions in crop development. (*Research purpose*) To develop an information model for real-time crop monitoring and decision support based on data collected by unmanned aerial vehicles (UAVs). (*Materials and methods*) Data obtained from UAVs support key crop management operations, including variable-rate spraying based on treatment zone maps, site-specific and zonal fertilization guided by the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and the Normalized Difference Red Edge Index (NDRE), early detection of diseases and pests, and yield forecasting through statistical analysis of time series. A systematic content analysis of existing literature was conducted. Given the large volume and diversity of associated with UAV application in agriculture, particularly in cereal crop production, an appropriate information modeling approach was identified and substantiated. (*Results and discussion*) The advantages and limitations of UAV use were identified. It was shown that UAV-based agricultural monitoring generates vast and diverse datasets that require systematic collection, structuring, and efficient processing. The study substantiates and proposes an information model scheme for real-time crop monitoring and decision support in precision agriculture. The model includes modules for data collection and preprocessing, a computational module for mathematical analysis incorporating modeling and machine learning, and an expert system that generates recommendations for agro-technical interventions. (*Conclusions*) The study demonstrates that the effective integration of UAVs into crop management processes can reduce the consumption of fuel, water, fertilizers, and pesticides. Additionally, the use of UAVs increases yield potential and improves labor efficiency by enabling precise monitoring, automation, and optimization of agro-technical operations.

Keywords: unmanned aerial vehicle (UAV), monitoring, information model, crop production, crop management.

■ **For citation:** Alt V.V., Soloshenko A.A., Isakova S.P., Savchenko O.F., Elkin O.V. Use of UAVs in agriculture for monitoring and management of cereal crops. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N4. 49-56 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-4-49-56. EDN: VWQHJC.

В области систем точного земледелия постоянно разрабатываются и совершенствуются новые аппаратные средства для мониторинга посевов, хранения и анализа данных, а также для выполнения технологических операций по уходу за растениями. Аэрофотосъемка с использованием БПЛА – наиболее простой инструментальный и действенный метод получения точных данных о контуре и площади полей, состоянии почв и растений. Оснащение БПЛА соответствующими программно-аппаратными средствами дает возможность собрать информацию о изучаемом объекте, создать ортофотоплан, 3D-модель рельефа, карту высот и т.д. Контроль процессов в растениеводстве позволяет своевременно принимать решения по их корректировке [1-3].

В США, странах Европы, Бразилии, Аргентине технологии с применением БПЛА широко внедряются в агросекторе, однако активнее всего в Китае, который занимает лидирующие позиции по произ-

водству дронов. В России также проводятся работы по внедрению БПЛА в сельскохозяйственное производство [4]. Среди фирм, предоставляющих услуги в сфере применения агродронов, можно выделить: ООО «Агро Технологии» (Ростов-на-Дону), ООО «Совзонд» (Москва), ООО «ХиЗаРа» (Барнаул), ООО «АгроДронГрупп» (Сколково), ГК «Гео-скан» (Санкт-Петербург, Екатеринбург), «Беспилот Агро» (Воронеж), ООО «Агродрон-62» (Рязань), AgroScout и Flyseeagro (Краснодар), «БВС-Агро» (Калужская область) и ряд других. Следует отметить, что, несмотря на появление в последнее время множества компаний-разработчиков, запчасти для БПЛА часто используются импортные [5].

В сибирском регионе услуги по агромониторингу предоставляют ряд компаний. Например, ГК «Смотрим с неба» (Томск) организовала школу управления агродронами и поставила на рынок уже 300 дронов собственного производства (<https://smotrimsnaba.ru/> дата обращения: 07.08.2025).



Лаборатория беспилотных авиационных систем (БАС) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) на Международном форуме «Технопром-2023» продемонстрировала свою модель БПЛА «НТ-30 Агро» (<https://форумтехнопром.рф/> дата обращения: 07.08.2025). Компания «Умные дроны» (Новосибирск) разработала разведывательный агродрон со встроенным модулем машинного обучения (<https://smotrimisneba.ru/> 07.08.2025). Несколько компаний предлагают услуги ухода за посевами. Например, ООО «Агро-Сибирь» (Алтайский край) осуществляет демо-практику обработки подсолнечника агродронами XAG [6]. Компания «Галэкс» (Алтайский край) предоставляет услуги по обработке с помощью БПЛА подсолнечника на площади 300 га (www.galex.ru/news/7786/ дата обращения: 07.08.2025).

Дроны делятся на два класса: самолетного типа (с неподвижным крылом) и мультироторные (коптеры). БПЛА самолетного типа могут облететь за один полет территорию примерно в 10 раз большую, чем коптеры. Однако при высокой скорости снижается разрешающая способность камер и ухудшается качество снимков [7].

БПЛА используется для проведения нескольких ключевых операций ухода за посевами.

Дифференцированное опрыскивание. БПЛА, оснащенные системами точного дозирования и мультиспектральными или RGB-камерами, способны выполнять операции внесения пестицидов и гербицидов по картам навигации с учетом плотности растительности и наличия вредителей [8]. При оптимальных параметрах полета (высота 1,5-2,5 м, скорость 2-4 м/с) [9, 10] достигается равномерное распределение капель на всех уровнях растительного покрова, что обеспечивает контролируемую плотность осадения (например, 46-54 капли/см²) [11] и высокую эффективность борьбы с вредителями (до 92% контроля через 7-10 дней) [12].

Точечное и зональное внесение удобрений. БПЛА самолетного типа и мультироторные, оборудованные баками для жидких или гранулированных агрохимикатов, осуществляют целенаправленное внесение удобрений. По данным аэро съемки и вычисленным вегетационным индексам (NDVI, NDRE) формируются карты предписаний, согласно которым обрабатываются только проблемные зоны, что снижает расход удобрений до 30% без потери урожайности [13].

Мониторинг и уход за сельскохозяйственными культурами. Внедрение БПЛА для этих целей является значимым этапом технологического прогресса. Традиционные методы наблюдения за развитием растений трудоемкие и затратные, например обследование полей агрономами по нормативным маршрутам передвижения. Исполь-

зование спутниковых снимков из-за неблагоприятных погодных условий, низкого пространственного разрешения и большого интервала до повторного посещения затрудняет своевременный и детальный мониторинг.

При оценке всхожести сельскохозяйственных культур и оперативного мониторинга состояния посевов с помощью БПЛА возможно в течение нескольких часов обследовать посевы, выявить проблемные участки всходов и спланировать необходимые работы. После первичного обследования и оперативно принятых мер можно проводить дальнейшие наблюдения для контроля качества выполнения этих работ и фиксировать изменения в состоянии посевных культур.

Мониторинг болезней и вредителей сельскохозяйственных культур с применением дронов широко распространен. На основе данных с БПЛА, оснащенного мультиспектральными и RGB-датчиками, выявляются сорняки, болезни и наличие вредителей растений в полях. В результате обработки данных с использованием совокупности цифровых технологий определяются территории и количество химикатов для борьбы с обнаруженными заражениями [14]. При этом достаточно выявить очаги заражения и с БПЛА дифференцированно выполнить эту операцию. Аналогично согласно алгоритму технологического процесса осуществляется дифференцированное внесение удобрений и ускорителей роста растений, что позволяет существенно снизить затраты на выращивание сельхозпродукции [15].

Прогнозирование урожайности. По изображениям с мультикоптерных дронов участков полей с помощью передовых информационных технологий – методов искусственного интеллекта, когнитивного моделирования, моделирования на основе искусственных нейронных сетей, а также классификации изображений и распознавания образов можно непосредственно оценить и спрогнозировать уровень продуктивности агрокультур [16].

БПЛА, оснащенные мультиспектральными камерами с высокой четкостью изображения, позволяют точно определять проблемные участки поля. БПЛА оборудуются также различными датчиками, системами спутниковой навигации, малогабаритными бортовыми компьютерами. С точки зрения эффективности использования БПЛА особое значение имеет наличие развитого прикладного программного обеспечения, основанного на интеграции современных информационных технологий. В связи с накоплением большого количества разнообразной информации, которую нужно целенаправленно собирать, систематизировать и качественно обрабатывать, очевидна целесообразность формирования информационной модели.

Цель исследования. Разработать информационную модель процесса оперативного мониторинга и поддержки принятия решений в рамках системы точного земледелия при выполнении технологических операций с применением БПЛА.

Материалы и методы. В исследовании использовался комплекс методов, включающий информационные и аналитические подходы, системный анализ, а также контент-анализ материалов о применении БПЛА. С учетом значительного объема и разнообразия данных был обоснован выбор метода информационного моделирования.

Информационная модель представляет собой структурированное описание существенных свойств объекта и взаимосвязей. Модель формализована в соответствии с поставленной целью исследования и зафиксирована на информационном носителе. Данный подход позволяет обеспечить точность и воспроизводимость результатов, а также способ-

ствует их интеграции в существующие информационные системы [17].

Результаты и обсуждение. Рассмотрены преимущества и недостатки применяемых в настоящее время БПЛА (*таблица*), отмеченные также в работах других авторов [18, 19]. Окончательный вывод о использовании БПЛА в тех или иных операциях должен принимать производитель продукции по предложению инженеров и агрономов с учетом результатов мониторинга и средств ухода за посевами.

Установлено также, что вегетационные индексы на стадиях выметывания и появления колоса последовательно предсказывают потенциал урожайности зерновых. Для оценки урожайности пшеницы наиболее важной оказалась фаза выметывания. Это указывает на то, что не все стадии роста одинаково информативны для прогнозирования урожайности. Таким образом, сосредоточение сбора данных на

Преимущества и недостатки применения БПЛА в сельском хозяйстве BENEFITS AND LIMITATIONS OF UAV USE IN AGRICULTURE	
Преимущества	Недостатки
<p>Повышение эффективности:</p> <ul style="list-style-type: none"> автоматизация задач, таких как мониторинг и уход за посевами, значительно сокращает время и трудозатраты; дроны могут обрабатывать сотни гектаров в день; маневренность позволяет работать в труднодоступных местах; автономность полетов дает возможность минимизировать человеческие ошибки 	<p>Технические ограничения:</p> <ul style="list-style-type: none"> ограниченная продолжительность полета (20–40 мин), малая грузоподъемность, а также чувствительность к погодным условиям снижают эффективность операций; сильный ветер или осадки могут не только прервать работу, но и повредить технику; из-за частой замены батарей прерывается рабочий процесс, особенно на больших полях (актуально для малогабаритных БПЛА и мультироторов)
<p>Переход к системе точного земледелия:</p> <ul style="list-style-type: none"> высокоточное дозирование и распыление удобрений и пестицидов сокращают расход химикатов до 30% и минимизирует их воздействие на окружающую среду; благодаря GPS/GNSS навигации и возможности регулировать размер капель обеспечивается равномерное покрытие. Это дает экономию средств и снижает химический сток в водоемы и почву 	<p>Экологические и социальные аспекты:</p> <ul style="list-style-type: none"> шумовое загрязнение окружающей среды, оказывающее влияние на дикую природу; электронные отходы от отработанных батарей; сопротивление со стороны фермеров к переходу на новые технологии является важным негативным фактором; демографические барьеры и отсутствие цифрового образования могут замедлять внедрение технологии в некоторых регионах
<p>Улучшенный мониторинг:</p> <ul style="list-style-type: none"> мультиспектральные, гиперспектральные и тепловизионные сенсоры выявляют проблемы (болезни, вредителей, засуху) на ранних стадиях, до их визуального обнаружения; сбор данных в реальном времени позволяет переходить от реактивного к проактивному управлению, предотвращая потери урожая; дроны также используются для мониторинга состояния пастбищ и здоровья скота 	<p>Риски безопасности:</p> <ul style="list-style-type: none"> столкновения, падения и физические травмы БПЛА, а также уязвимость к кибератакам (взлом, спуфинг GPS) требуют комплексных мер защиты; кибератаки могут привести к краже данных или потере контроля над аппаратом, что критично для ведения точного земледелия; необходимость обеспечения физической безопасности операторов и окружающих людей представляет собой серьезную проблему
<p>Экономические выгоды:</p> <ul style="list-style-type: none"> снижение затрат на топливо, рабочую силу, химикаты, повышение урожайности позволяют сократить срок окупаемости инвестиций (ROI) до 1,5–3 лет для крупных предприятий (без учета скрытых издержек); стоимость обработки гектара с помощью дрона значительно ниже по сравнению с традиционными методами; сокращение потерь урожая из-за отсутствия выпатывания животными вносит свой вклад в повышение общей рентабельности 	<p>Высокие затраты:</p> <ul style="list-style-type: none"> первоначальная стоимость дронов (~780 тыс. руб. – 4,674 млн руб.), ПО и комплектующих, а также расходы на обслуживание и замену батарей являются барьером для многих хозяйств; стоимость одной батареи может достигать ~235 тыс. руб., а ее жизненный цикл ограничен 2-3 годами; ежегодные затраты на обслуживание могут составлять 10-15% от первоначальной стоимости дрона
<p>Экология и безопасность:</p> <ul style="list-style-type: none"> снижение химического загрязнения, уплотнения почвы и выбросов углерода; минимизируется контакт работников с вредными пестицидами; отсутствие тяжелой техники позволяет сохранить структуру почвы и биоразнообразие, в том числе полезных насекомых-опылителей; снижение рисков для здоровья фермеров как важное социальное преимущество 	<p>Правовое регулирование и контроль:</p> <ul style="list-style-type: none"> сложное, постоянно меняющееся законодательство в области учета и контроля использования беспилотных гражданских воздушных судов; необходимость получения лицензий и ограничения на полеты (высота, зоны) создают юридические трудности

критических фенологических окнах позволяет получать наиболее точные и своевременные прогнозы урожайности, оптимизировать принятие решений по уборке, тем самым повышать эффективность использования информационных материалов [20].

Проведен всесторонний анализ функциональных возможностей использования БПЛА в производстве зерновых культур, а также различных информационных технологий, обеспечивающих целенаправленный сбор, систематизацию и обработку данных, сопровождающих технологические процессы. На основе полученных результатов разработана

схема информационной модели мониторинга и поддержки принятия решений с применением БПЛА. Данная схема представлена на рисунке.

Исходным пунктом модели является объект, т.е. поле или участок, для которого определяются ключевые атрибуты: размер/площадь, состав почвы, культура (растение), агроклиматические условия и используемый парк техники. Эти параметры являются исходными для всех последующих действий и анализа.

Данные об объекте поступают из различных источников: беспилотных летательных аппаратов; спутников; наземных датчиков; метеостанций; их архивных

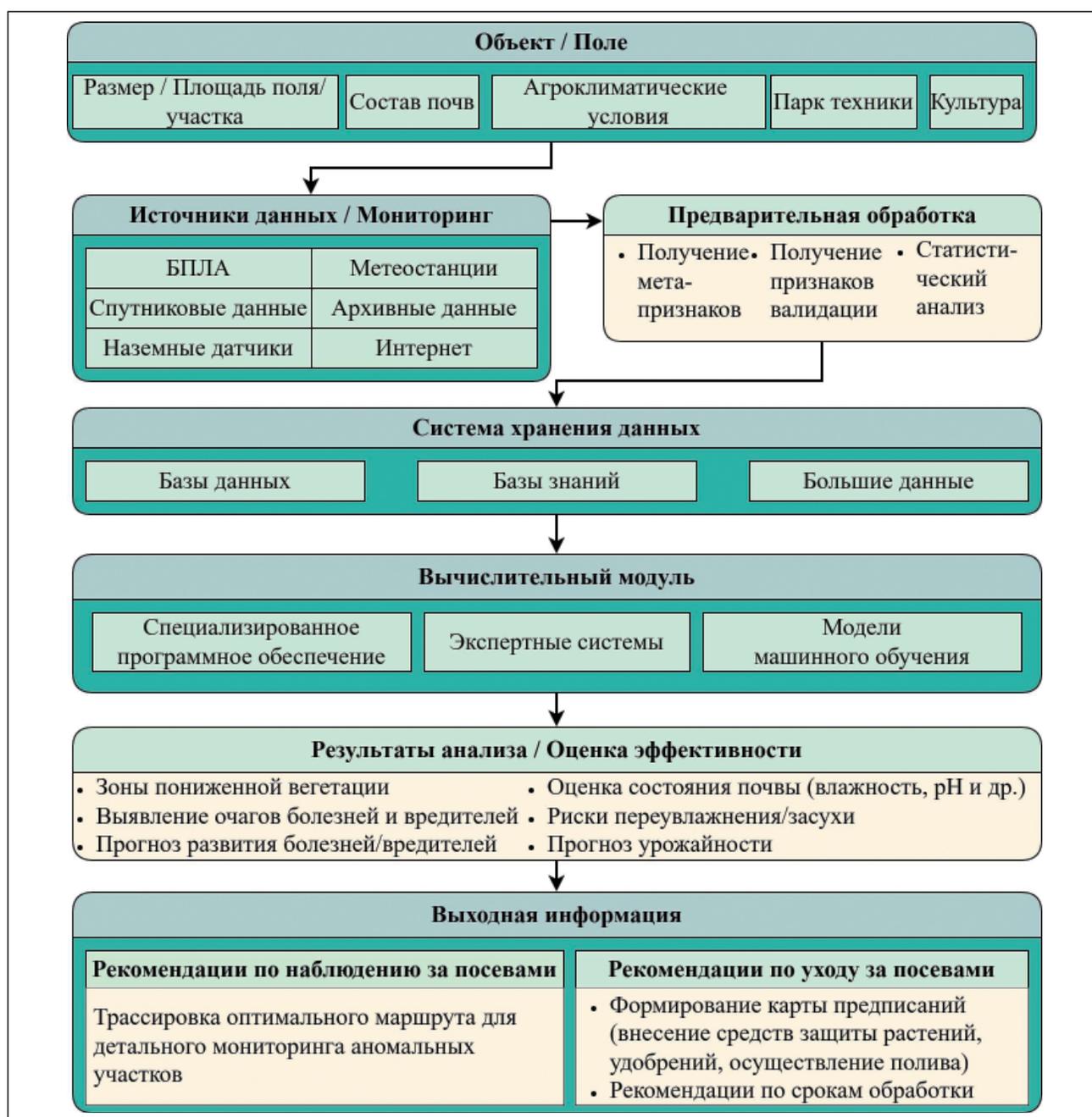


Рисунок. Схема информационной модели оперативного мониторинга и поддержки принятия решений на основе данных с БПЛА

Figure. Schematic representation of an information model for UAV-based operational monitoring and decision support

данных; Интернета. Каждый источник предоставляет уникальные пространственные, климатические или исторические сведения о поле и состоянии посевов.

Информация проходит этап предварительной обработки, которая включает:

- получение метапризнаков из визуально-графической информации (ширина и высота, количество пикселей на дюйм, время и географические координаты съемки);

- валидацию данных (получение признаков и приведение к единообразному виду согласно стандартизации данных);

- извлечение признаков (получение данных с объекта для их сохранения в Системе хранения данных).

Обработанные сведения накапливаются в хранилище различными методами хранения для эффективного использования элементами вычислительного модуля:

- базы данных (количественные данные с датчиков, метеостанций, архивные данные);

- базы знаний (информация, поступающая из интернета);

- большие данные (датасеты, формирующиеся с помощью БПЛА и спутниковых данных).

Этим обеспечивается централизованный доступ к дальнейшим вычислениям и анализу.

Ключевой этап обработки данных осуществляется в вычислительном модуле и включает работу:

- специализированного программного обеспечения (готовые программные решения, модели и алгоритмы для анализа и прогнозирования);

- моделей машинного обучения (обработка данных, создание и тестирование прогнозных моделей);

- экспертных систем (использование знаний и логик агрономов, интеграция правил и факторов, влияющих на принимаемые решения).

На выходе модели формируются результаты анализа/оценка эффективности в виде следующих данных:

- зоны пониженной вегетации и карты повторного обследования;

- карты предписаний (СЗР, удобрения, полив и др.);

- выявление очагов болезней и вредителей;

- прогноз развития болезней, вредителей и рисков (в том числе погодных);

- оценка состояния почвы, уровня питания, густоты посевов;

- рекомендации по срокам и способам обработки;

- прогноз урожайности и анализ динамики изменений и т.д.

По результатам анализа формируется выходная информация. Если требуется дополнительный мониторинг аномальных участков, то предлагается оптимальный маршрут облета для точечного наблюдения только таких участков. При необходимости ухода за посевами формируются карты предписаний (внесе-

ние средств защиты растений, удобрений, осуществление полива) и рекомендации по срокам обработки.

Полученные данные предназначены для обеспечения информационной поддержки при принятии решений конечным пользователем. На основе анализа и интерпретации этих данных пользователь формирует стратегию агротехнических мероприятий по уходу за посевами.

Таким образом, в информационной модели оперативного мониторинга и поддержки принятия решений на основе данных с БПЛА показан сквозной поток информации от сбора и первичной обработки данных до получения аналитических и прогнозных результатов для оперативного принятия научно-обоснованных решений при выполнении технологических операций.

Выводы. Проведен анализ, выявлены преимущества и недостатки применения БПЛА при мониторинге и уходе за посевами.

Показана возможность перехода к более точному ведению земледелия как можно большего количества хозяйств за счет получения с помощью БПЛА непосредственно визуальную информацию в режиме реального времени с охватом больших площадей, оценивать воздействие природных факторов на различные культуры, выявлять отклонения и нарушения в развитии растений, проводить обработку посевов, а также осуществлять своевременную оценку качества выполненных работ.

Разработана схема информационной модели оперативного мониторинга посевов и поддержки принятия решений в точном земледелии на основе данных с БПЛА. Схема состоит из блоков получения данных, их предварительной обработки и вычислительного модуля, включающего математический анализ с применением моделирования, машинного обучения и экспертной системы.

Внедрение БПЛА в технологические операции сельскохозяйственного производства при грамотной организации процесса позволит снизить затраты на ресурсы топлива, воды, удобрений и пестицидов. Это способствует повышению урожайности и эффективности использования трудовых ресурсов за счет точного мониторинга, автоматизации и оптимизации агротехнических мероприятий. Кроме того, применение БПЛА позволит улучшить конкурентоспособность растениеводческого хозяйства.

В дальнейшем планируется усовершенствование информационной модели, в том числе ее внедрение и тестирование в реальных условиях для оценки эффективности и корректности обработки данных и обратной связи, а также совершенствование алгоритмов машинного обучения и экспертных систем (включая глубокое обучение) для повышения точности прогнозов урожайности, выявления болезней и вредителей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хабарина Д.С., Тишанинов И.А. Анализ применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) различного типа в сельском хозяйстве // *Наука без границ*. 2021. N4 (56). С. 78-83.
2. Ценч Ю.С., Курбанов Р.К., Захарова Н.И. Развитие систем управления полетом и средств аэрофотосъемки беспилотных воздушных судов сельскохозяйственного назначения // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. N2. С. 11-19. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-11-19.
3. Ценч Ю.С., Курбанов Р.К. История развития систем управления беспилотных воздушных судов // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. N3. С. 4-15. DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-3-4-15.
4. Старовойтов С.И., Ценч Ю.С., Коротченя В.М., Личман Г.И. Технические системы цифрового контроля качества обработки почвы // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. N14(1). С. 16-21. DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-1-16-21.
5. Урасова А.А., Глезман Л.В., Федосеева С.С. Применение беспилотных летательных аппаратов в сельском хозяйстве РФ: оценка региональной популярности потребительских предпочтений // *Экономика региона*. 2023. Т. 19(4). С. 1146-1160. DOI: 10.17059/ekon.reg.2023-4-15.
6. Ковалев А.С., Литвинов А.А. Опыт фунгицидной обработки подсолнечника агродронами XAG в ООО «Агро-Сибирь» // *Аграрная политика*. 2025. Т. 1. N2. 44-47.
7. Zhang R., Hewitt A., Li L. et al. Editorial: advanced technologies of UAV application in crop pest, disease and weed control. *Frontiers in Plant Science*. 2023. Vol. 14. 1-3. DOI: 10.3389/fpls.2023.1253841.
8. Дорохов А.С., Старостин И.А., Ещин А.В. Перспективы развития методов и технических средств защиты сельскохозяйственных растений // *Агроинженерия*. 2021. N1(101). С. 26-35. DOI: 10.26897/2687-1149-2021-1-26-35.
9. Meng Ya., Zhong W., Liu Yu et al. Droplet distribution of an autonomous UAV-based sprayer in *Citrus Tree Canopy*. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 2203. 2. DOI: 10.1088/1742-6596/2203/1/012022.
10. Lan Y., Qian S., Chen S. et al. Influence of the downwash wind field of plant protection UAV on droplet deposition distribution characteristics at different flight heights. *Agronomy*. 2021. Vol. 11(12), 2399. 1-13. DOI: 10.3390/agronomy11122399.
11. Gibbs J., Peters T.M., Heck L.P. Comparison of droplet size, coverage, and drift potential from UAV application methods and ground application methods on row crops. *Trans ASABE*. 2021. Vol. 64(3). 819-828. DOI: 10.13031/trans.14121.
12. Subramanian K.S., Pazhanivelan S., Srinivasan G. et al. Drones in insect pest management. *Frontiers in Agronomy*. 2021. Vol. 3. 1-12. DOI: 10.3389/fagro.2021.640885.
13. Guebsi R., Mami S., Chokmani K. Drones in precision agriculture: A comprehensive review of applications, technologies, and challenges. *Drones*. 2024. Vol. 8(11). 686. 1-30. DOI: 10.3390/drones8110686.
14. Дорохов А.С., Старостин И.А., Ещин А.В., Курбанов Р.К. Технические средства для химической защиты растений: состояние и перспективы развития // *Агроинженерия*. 2022. Т. 24. N3. С. 12-18. DOI: 10.26897/2687-1149-2022-3-12-18.
15. Бершицкий Ю.И., Сайфетдинов А.Р., Максименко А.А., Елфимов Д.А. Экономическая эффективность применения беспилотных летательных аппаратов как элемента цифровизации растениеводства // *Вестник Академии знаний*. 2024. Т. 2(61). С. 66-69. EDN: DDRCKH.
16. Raj M., Harshini N.B., Gupta Sh. et al. Leveraging precision agriculture techniques using UAVs and emerging disruptive technologies. *Energy Nexus*. 2024. Vol. 14. 1-25. DOI: 10.1016/j.nexus.2024.100300.
17. Ядровская М.В. К вопросу о компьютерном моделировании. *Advanced Engineering Research*. 2020. Т. 20. N3. С. 332-345. DOI: 10.23947/2687-1653-2020-20-3-332-345.
18. Салаев Б.К., Серёгин А.А., Эвиев В.А. и др. Анализ применения беспилотных летательных аппаратов в сельском хозяйстве // *Вестник аграрной науки Дона*. 2022. Т. 15(4). С. 29-44. DOI: 10.55618/20756704_2022_15_4_29-44.
19. Makam S., Komatineni Bh.K., Meena S.S., Meena U. Unmanned aerial vehicles (UAVs): an adoptable technology for precise and smart farming. *Discover Internet of Things*. 2024. Vol. 4. N12. 1-30. DOI: 10.1007/s43926-024-00066-5.
20. Liu Ji., Wang W., Li Ju. et al. UAV remote sensing technology for wheat growth monitoring in precision agriculture: comparison of data quality and growth parameter inversion. *Agronomy*. 2025. Vol. 15(1), 159. 1-24. DOI: 10.3390/agronomy15010159.

REFERENCES

1. Habarina D.S., Tishaninov I.A. Analysis of the use of various types of unmanned aerial vehicles (UAVs) in agriculture. *Science Without Borders*. 2021. N4(56). 78-83 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-3-4-15.
2. Tsench Yu.S., Kurbanov R.K., Zakharova N.I. Evolution of flight control systems and aerial photography in unmanned agricultural aircraft. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N2. 11-19 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-11-19.
3. Tsench Yu.S., Kurbanov R.K. History of unmanned aircraft flight controller development. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023. Vol. 17. N3. 4-15 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-3-4-15.
4. Starovoytov S.I., Tsench Yu.S., Korotchenya V.M., Lichman G.I. Technical systems for digital soil quality control. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2020. N14(1). 16-21 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-1-16-21.
5. Urasova A.A., Glezman L.V., Fedoseeva S.S. The use of agricultural unmanned aerial vehicles in the Russian

- Federation: assessment of consumer preferences. *Economy of Regions*. 2023. N19(4). 1146-1160 (In Russian). DOI: 10.17059/ekon.reg.2023-4-15.
6. Kovalev A.S., Litvinov A.A. The experience of fungicidal treatment of sunflower with XAG agrodrons in Agro-Siberia LLC. *Agrarian Policy*. 2025. Vol. 2. 44-47 (In Russian).
 7. Zhang R., Hewitt A., Li L. et al. Editorial: advanced technologies of UAV application in crop pest, disease and weed control. *Frontiers in Plant Science*. 2023. Vol. 14. 1-3 (In English). DOI: 10.3389/fpls.2023.1253841.
 8. Dorokhov A.S., Starostin I.A., Eschin A.V. Development prospects for methods and technical means of farm crop protection. *Agricultural Engineering*. 2021. N1 (101). 26-35 (In Russian). DOI: 10.26897/2687-1149-2021-1-26-35.
 9. Meng Ya., Zhong W., Liu Yu et al. Droplet distribution of an autonomous UAV-based sprayer in Citrus Tree Canopy. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 2203. 2 (In English). DOI: 10.1088/1742-6596/2203/1/012022.
 10. Lan Y., Qian S., Chen S. et al. Influence of the downwash wind field of plant protection UAV on droplet deposition distribution characteristics at different flight heights. *Agronomy*. 2021. Vol. 11(12). 2399. 1-13 (In English). DOI: 10.3390/agronomy11122399.
 11. Gibbs J., Peters T.M., Heck L.P. Comparison of droplet size, coverage, and drift potential from UAV application methods and ground application methods on row crops. *Trans ASABE*. 2021. Vol. 64(3). 819-828 (In English). DOI: 10.13031/trans.14121.
 12. Subramanian K.S., Pazhanivelan S., Srinivasan G. et al. Drones in insect pest management. *Frontiers in Agronomy*. 2021. Vol. 3. 1-12 (In English). DOI: 10.3389/fagro.2021.640885.
 13. Guebsi R., Mami S., Chokmani K. Drones in precision agriculture: A comprehensive review of applications, technologies, and challenges. *Drones*. 2024. Vol. 8(11). 686. 1-30 (In English). DOI: 10.3390/drones8110686.
 14. Dorokhov A.S., Starostin I.A., Eshchin A.V., Kurbanov R.K. Technical means for chemical protection of plants: current state and development prospects. *Agricultural Engineering*. 2022. N24(3). 12-18 (In Russian). DOI: 10.26897/2687-1149-2022-3-12-18.
 15. Bershtitsky Yu.I., Saifetdinov A.R., Maksimenko A.A., Elfimov D.A. Economic efficiency of using unmanned aerial vehicles as an element of digitalization of crop production. *Bulletin of the Academy of Knowledge*. 2024. Vol. 2(61). 66-69 (In Russian). EDN: DDRCKH.
 16. Raj M., Harshini N.B., Gupta Sh. et al. Leveraging precision agriculture techniques using UAVs and emerging disruptive technologies. *EnergyNexus*. 2024. Vol. 14. 1-25 (In English). DOI: 10.1016/j.nexus.2024.100300.
 17. Yarovskaya M.V. Revisiting computer modeling. *Advanced Engineering Research*. 2020. Vol. 20. N3. 332-345 (In Russian). DOI: 10.23947/2687-1653-2020-20-3-332-345.
 18. Salaev B.K., Seregin A.A., Eviev V.A. et al. Analysis of using unmanned aerial vehicles in agriculture. *Don Agrarian Science Bulletin*. 2022. N15-4(60). 29-44 (In Russian). DOI: 10.55618/20756704_2022_15_4_29-44.
 19. Makam S., Komatineni Bh.K., Meena S.S., Meena U. Unmanned aerial vehicles (UAVs): an adoptable technology for precise and smart farming. *Discover Internet of Things*. 2024. Vol. 4. N12. 1-30 (In English). DOI: 10.1007/s43926-024-00066-5.
 20. Liu J., Wang W., Li Ju. et al. UAV remote sensing technology for wheat growth monitoring in precision agriculture: comparison of data quality and growth parameter inversion. *Agronomy*. 2025. Vol. 15(1). 159. 1-24 (In English). DOI: 10.3390/agronomy15010159.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Альт В.В. – постановка задачи, научное руководство, окончательное одобрение текста статьи;

Солошенко А.А. – сбор и обработка данных, литературный анализ, подготовка текста;

Исакова С.П. – редактирование текста, теоретический анализ, подготовка статьи;

Савченко О.Ф. – теоретический анализ;

Елкин О.В. – редактирование текста.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Alt V.V. – problem formulation, scientific supervision, final approval of the manuscript;

Soloshenko A.A. – data collection and processing, literature review, manuscript preparation;

Isakova S.P. – theoretical analysis, text editing, manuscript preparation;

Savchenko O.F. – theoretical analysis;

Elkin O.V. – manuscript editing.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию

Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on

The paper was accepted for publication on

23.09.2025

25.11.2025

EDN: HXMLNC

DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-4-57-65



Научная статья

УДК 631



Оценка потребности сельского хозяйства в технологиях точного земледелия

Антон Павлович Акпасов,кандидат технических наук, заведующий отделом,
e-mail: 1a9@mail.ru;**Ренат Бариевич Туктаров,**кандидат сельскохозяйственных наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: tuktarov.rb@gmail.com;**Марина Евгеньевна Кадомцева,**кандидат экономических наук,
старший научный сотрудник,
e-mail: kozyreva_marina_@mail.ru;**Дмитрий Алексеевич Греков,**младший научный сотрудник,
e-mail: greckov.dmitry@yandex.ru

Волжский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации, г. Энгельс, Российская Федерация

Реферат. Отметим, что в условиях нарастающих климатических изменений в регионах Российской Федерации в виде учащения засух, неравномерных осадков и роста температур технологии точного земледелия становятся важнейшим инструментом обеспечения устойчивости сельскохозяйственного производства. Одним из направлений точного земледелия является фертигация – метод одновременного орошения и внесения удобрений. *(Цель исследования)* Оценка потребности российского аграрного сектора в технологиях фертигации, анализ тенденций и региональных особенностей внедрения. *(Материалы и методы)* На основе анализа данных Росстата и Росгидромета проведена оценка взаимосвязи параметров развития растениеводства в 28 выбранных регионах Южного, Северо-Кавказского и Приволжского федеральных округов с климатическими и производственными характеристиками. Исследование тенденций развития технологий фертигации в Российской Федерации основано на патентном обзоре, экспертных оценках, данных отраслевых отчетов и информации от производителей. *(Результаты и обсуждение)* Корреляционный анализ показал зависимость урожайности основных сельскохозяйственных культур от внесенных объемов минеральных и органических удобрений. Однако эффективность применения удобрений существенно варьируется в зависимости от региональных особенностей. Полученные результаты сопоставлены с динамикой климатических рисков, наиболее часто проявляющихся на территории выбранных регионов. Нарастающее воздействие неблагоприятных климатических факторов в регионах растениеводческой специализации обуславливает значительный потенциал фертигации. Анализ отечественного рынка данных технологий показал, что доля российских разработок остается недостаточной для импортозамещения. Исследование российской и международной баз данных о патентах подтвердил глобальный тренд на цифровизацию и автоматизацию фертигации. *(Выводы)* Фертигация как важнейшая часть технологий точного земледелия имеет высокую значимость для перехода к климатически оптимизированному сельскому хозяйству в условиях аридизации. Региональный анализ выявил зависимость урожайности от объемов удобрений, однако эффективность их применения варьируется под влиянием климатических факторов и агротехнических условий. Для снижения импортозависимости и внедрения интеллектуальных систем фертигации необходимы государственная поддержка НИОКР и локализация технологий, учитывающих специфику российских регионов.

Ключевые слова: изменение климата, сельское хозяйство, аридные зоны, орошаемое земледелие, фертигация, минеральные и органические удобрения, урожайность, цифровизация, импортозамещение.

■ **Для цитирования.** Акпасов А.П., Туктаров Р.Б., Кадомцева М.Е., Греков Д.А. Оценка потребности сельского хозяйства в технологиях точного земледелия // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2025. Т. 19. N4. С. 57-65. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-4-57-65. EDN: HXMLNC.

Scientific article

Evaluating the Need for Precision Farming Technologies in the Agricultural Sector

Anton P. Akpasov,Ph.D.(Eng.), head of department,
e-mail: 1a9@mail.ru;**Renat B. Tuktarov,**Ph.D.(Eng.), leading researcher,
e-mail: tuktarov.rb@gmail.com;**Marina Ye. Kadomtseva,**Ph.D.(Eng.), senior researcher,
e-mail: kozyreva_marina_@mail.ru;**Dmitry A. Grekov,**junior researcher,
e-mail: greckov.dmitry@yandex.ru

Volzhsy Research Institute of Hydraulic Engineering and Land Reclamation, Engels, Russian Federation

Abstract. The paper highlights that in the context of intensifying climate change across various regions of the Russian Federation, marked by more frequent droughts, irregular precipitation, and rising temperatures, precision agriculture technologies are becoming an essential for enhancing the resilience of agricultural production. One of such technologies is fertigation, which combines irrigation with the application of fertilizers. *(Research purpose)* The study aims to assess the demand for fertigation technologies in the Russian agricultural sector and to analyze trends and regional characteristics of their adoption. *(Materials and methods)* The research draws on data from Rosstat and Roshydromet to evaluate the relationship between crop production indicators and both climatic and production conditions in the Southern, North Caucasian, and Volga Federal Districts. Trends in fertigation development in Russia were examined through patents reviews, expert evaluations, industry reports, and information from equipment manufacturers. *(Results and discussion)* Correlation analysis revealed a relationship between the yields of major crops and the volumes of mineral and organic fertilizers applied. However, fertilizer use efficiency varies significantly across regions due to differing local conditions. These findings were analyzed alongside the dynamics of climate risks prevalent in the selected regions. The increasing impact of adverse climatic factors in crop-specialized areas highlights the growing potential of fertigation. An analysis of the domestic fertigation technology market indicates that Russian-developed solutions are still insufficient to meet import substitution goals. A review of Russian and international patent databases also confirms a global trend toward the digitalization and automation of fertigation processes. *(Conclusions)* As a key component of precision agriculture, fertigation is crucial for promoting climate-resilient farming practices amid increasing aridity. Regional analysis confirms that crop yields depend on fertilizer input, while fertilizer use efficiency is influenced by both climatic and agronomic factors. To reduce import dependence and enable the development of smart fertigation systems, targeted government support is required, particularly in research and development, and in localizing technologies suited to the specific conditions of Russian agricultural regions.

Keywords: climate change, agriculture, arid zones, irrigated farming, fertigation, mineral fertilizers, organic fertilizers, crop yield, digitalization, import substitution

For citation: Akpasov A.P., Tuktarov R.B., Kadomtseva M.Ye., Grekov D.A. Evaluating the need for precision farming technologies in the agricultural sector. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N4. 57-65 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-4-57-65. EDN: HXMLNC.

Глобальное изменение климата проявляется на территории Российской Федерации преимущественно в учащении засух, неравномерного распределения осадков и повышении температуры. Важнейшим условием устойчивого земледелия становится внедрение технологий фертигации. Согласно определению Всемирной продовольственной и сельскохозяйственной организации (ФАО ООН), фертигация – это практика подачи растворенных удобрений через системы орошения, что позволяет точно дозировать питательные вещества в соответствии с потребностями растений на разных стадиях роста.

Данный метод повышает эффективность использования воды и удобрений, снижая экологическую нагрузку. С одной стороны, фертигация позволяет оперативно корректировать режим подкормки сельскохозяйственных растений в текущих погодных условиях. Например, в периоды аномальной жары увеличить подачу калия для укрепления растений, а при затяжных дождях – добавить микроэлементы, предотвращающие грибковые заболевания. С другой стороны, фертигация может играть значимую роль в сохранении плодородия земель. В условиях прогрессирующих процессов почвенной эрозии и засоления из-за повышения испаряемости

точная подача питательных веществ к корням растений будет минимизировать воздействие на почву.

Значительное количество теоретических и практических исследований посвящено обоснованию эффективности технологий фертигации, развитию методов и проектированию технических средств орошения с одновременным внесением удобрений и необходимых химикатов [1]. Известны работы по технологиям фертигации, их влиянию на урожайность и экономику [2, 3]. Проведена оценка экономической эффективности фертигации для различных сельскохозяйственных культур [4, 5]. Исследователи приходят к выводу, что фертигация не только повышает рентабельность сельского хозяйства, но и становится ключевым инструментом для перехода к устойчивому земледелию [6, 7].

Изучение и развитие технологий фертигации в Российской Федерации критически важны для адаптации аграрного сектора к новым климатическим реалиям [8]. Важно оценить потенциал этого направления в повышении эффективности использования производственных ресурсов, выявить региональные особенности внедрения от засушливых южных районов до зон рискованного земледелия в Поволжье. Вектор интеграции технологий точного земледелия в национальные программы устой-

чивого сельского хозяйства должен строиться на научно обоснованных количественных результатах исследований. Это будет способствовать разработке адресных стратегий для разных типов хозяйств и перспективных механизмов государственной поддержки.

Цель исследования: оценка потребности российского аграрного сектора в технологиях фертигации, анализ тенденций и региональных особенностей их внедрения.

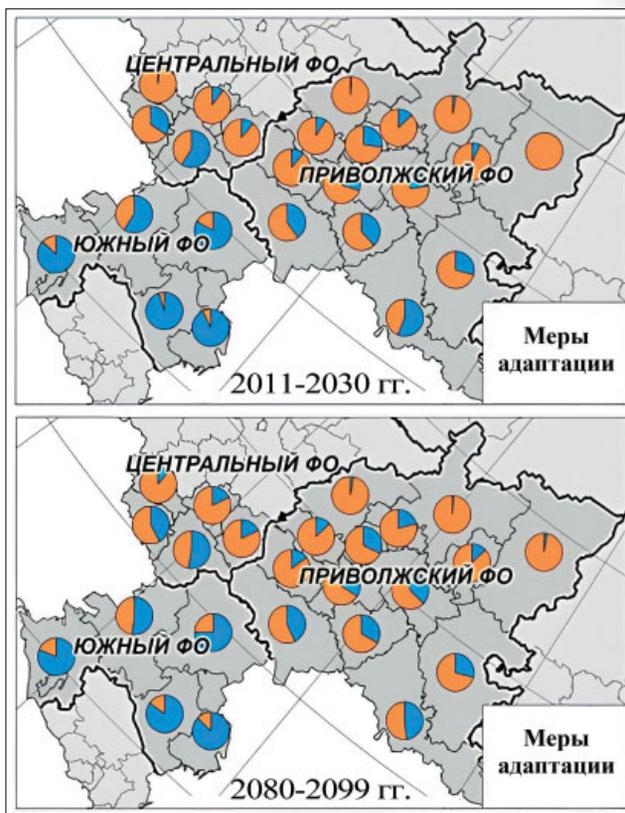
Материалы и методы. Методология исследования включает последовательную реализацию нескольких этапов.

На первом этапе сформирована выборка из 28 субъектов Российской Федерации в Северо-Кавказском, Южном и Приволжском федеральных округах. Данные регионы характеризуются высоким удельным весом производства продукции растениеводства в общероссийском объеме. Вместе с тем в этих регионах наиболее выражены признаки возрастающей аридности климата. Динамика последствий глобальных климатических изменений в виде длительных засух и сильных дождей вызывает значительные колебания урожайности и снижение производства сельскохозяйственных культур [9].

Прогнозные расчеты показывают, как будет меняться потребность в увлажнении и минеральном питании почвы Центрального, Приволжского и Южного федеральных округов в условиях ожидаемых климатических изменений (рис. 1). Так, в юго-восточных регионах Приволжского и в Южном федеральном округе при нарастании засушливых периодов потребуются не столько увеличение влагообеспеченности, сколько необходимость во внесении минеральных и органических удобрений.

Для эмпирического анализа были сформированы массивы метеорологических данных Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет) о количестве и продолжительности опасных погодных явлений на территории выбранной группы регионов. С целью определения климатического тренда исследованы погодные риски в период 1991-2019 гг. Количественные параметры по урожайности сельскохозяйственных культур и объемам внесенных удобрений за 2015-2022 гг. получены из открытых источников: Федеральной службы государственной статистики (Росстат) и Единой межведомственной информационно-статистической системы (ЕМИСС).

На основе этих данных построена типология выбранной группы регионов по урожайности сельскохозяйственных культур и проведен экономико-статистический анализ. С помощью коэффициента корреляции Пирсона была установлена и оценена взаимосвязь между урожайностью культур и объемами внесенных удобрений. Для визуализации



● Увлажнение ● Минеральное питание

Рис. 1. Прогнозные оценки мер адаптации производства зерновых культур к ожидаемым изменениям климата на территории Центрального, Приволжского и Южного федеральных округов (климатический сценарий RCP 4.5) [9]

Fig. 1. Projected adaptation measures for grain crop production in response to anticipated climate change in the Central, Volga, and Southern Federal Districts under climate scenario RCP 4.5 [9]

ции результатов использовались диаграммы рассеяния и графики динамики, что позволило выявить региональные особенности и обосновать значимость технологии фертигации для сельскохозяйственного производства выбранных регионов.

Информация о тенденциях развития российского рынка технологий фертигации весьма ограниченная, включает патентный обзор, экспертные оценки, данные отраслевых отчетов и информацию от производителей.

Результаты исследования. В таблице 1 представлены данные урожайности сельскохозяйственных культур и объемы внесенных минеральных и органических удобрений в регионах Приволжского, Южного и Северо-Кавказского федеральных округов. Для исследования зависимости между выбранными показателями проведен расчет с использованием коэффициента корреляции Пирсона. Результаты анализа выявили значимую статистическую связь между показателями урожайности картофеля и объ-

УРОЖАЙНОСТЬ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР И ОБЪЕМЫ ВНЕСЕНИЯ УДОБРЕНИЙ В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ОРГАНИЗАЦИЯХ ЗА 2022 Г.*						
CROP YIELDS AND FERTILIZER APPLICATION RATES IN AGRICULTURAL ENTERPRISES OF THE NORTH CAUCASIAN, SOUTHERN, AND VOLGA FEDERAL DISTRICTS IN 2022*						
Субъект Российской Федерации	Урожайность, ц/га			Удобрения		
	Бахчевые культуры	Картофель	Овощи открытого грунта	Сахарная свекла	минеральные, тыс. т**	органические, тыс. т
<i>Южный федеральный округ</i>						
Республика Адыгея	124,81	100	185,11	–	103,12	–
Республика Калмыкия	–	–	–	–	15,37	–
Республика Крым	164,61	146,09	232,48	–	86,97	234,77
Краснодарский край	83,79	198,83	87,8	573,01	3205,84	3691,65
Астраханская обл.	277,83	482,8	815,28	–	20,11	–
Волгоградская обл.	46,29	305,51	487,63	391,78	410,85	45,53
Ростовская обл.	60,72	324,22	357,49	526,29	2105,27	931,92
<i>Северо-Кавказский федеральный округ</i>						
Республика Дагестан	142,68	220,2	314,15	–	10,98	7,03
Республика Ингушетия	120	236,49	104,44	–	2,13	–
Кабардино-Балкарская Республика	–	258,85	260,53	–	71,13	–
Карачаево-Черкесская Республика	–	178,06	182,26	406,52	75,2	–
Республика Северная Осетия-Алания	72	291,2	149,85	–	40,75	–
Чеченская Республика	201,7	101,24	124,67	–	20,02	–
Ставропольский край	177,34	335,31	191,93	643,36	2335,53	5586,91
<i>Приволжский федеральный округ</i>						
Республика Башкортостан	–	146,3	128,21	321	449,73	2651,63
Республика Марий Эл	–	247,68	458,89	–	81,73	829,14
Республика Мордовия	–	225,91	64,63	373,03	405,48	690,74
Республика Татарстан	–	295,26	234,15	378,94	1179,12	3580,61
Удмуртская Республика	–	165,7	334,08	–	152,87	1 637,51
Чувашская Республика	137,14	250,95	353,44	356,36	93,11	710,25
Пермский край	–	181,6	143,32	–	71,07	1191,41
Кировская обл.	–	176,92	211,06	–	197,27	1386,01
Нижегородская обл.	343	325,65	414,81	304,4	314,89	1902
Оренбургская обл.	515,58	324,97	330,94	313,18	54	213
Пензенская обл.	–	303,67	414,04	440,13	582,34	1097,16
Самарская обл.	44,5	288,98	460,38	–	256,89	253,22
Саратовская обл.	89,03	263,07	160,61	527,48	176,47	106,01
Ульяновская обл.	–	252,81	407,69	351,99	176,43	280

*Составлено на основе данных Единой межведомственной информационно-статистической системы (ЕМИСС) <https://www.fedstat.ru/indicator/31533>.
 **В пересчете на 100 % питательных веществ.

емами внесенных под него минеральных удобрений (0,627) (рис. 2). В Ставропольском крае, Ростовской области и Республике Татарстан, где объемы применения удобрений стабильно большие, урожайность картофеля остается на высоком уровне. Однако в ряде регионов, таких как Астраханская и Оренбургская области, даже при низких объемах внесения удобрений урожайность картофеля демонстрирует средние значения, что говорит о более значимом влиянии других факторов в этих регионах.

Аналогичная ситуация наблюдается по урожайности овощей открытого грунта. В Астраханской области при высоких показателях урожайности овощей (до 810,8 ц/га в 2018 г.) объемы использования удобрений (17,8 тыс. ц) остаются умеренными. В таких регионах, как Волгоградская область или Республика Калмыкия, урожайность бахчевых варьируется независимо от количества удобрений, что указывает на приоритет климатических условий для этих культур.

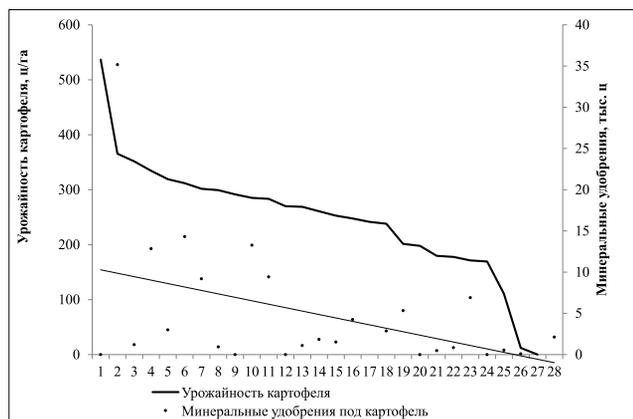


Рис. 2. Распределение выбранной группы регионов по урожайности картофеля и объемам внесенных под картофель минеральных удобрений в 2022 г. 1 – Кабардино-Балкария; 2 – Нижегородская обл.; 3 – Астраханская обл.; 4 – Самарская обл.; 5 – Пензенская обл.; 6 – Ростовская обл.; 7 – Татарстан; 8 – Волгоградская обл.; 9 – Мордовия; 10 – Ставропольский край; 11 – Чувашия; 12 – Оренбургская обл.; 13 – Марий Эл; 14 – Северная Осетия-Алания; 15 – Ульяновская обл.; 16 – Кировская обл.; 17 – Калмыкия; 18 – Удмуртия; 19 – Пермский край; 20 – Дагестан; 21 – Саратовская обл.; 22 – Башкортостан; 23 – Краснодарский край; 24 – Карачаево-Черкессия; 25 – Крым; 26 – Чечня; 27 – Адыгея; 28 – Ингушетия

Fig. 2. Distribution of selected regions of the Russian Federation by potato yield and mineral fertilizer application rates in potato cultivation in 2022

Тем не менее, прослеживается зависимость между урожайностью сахарной свеклы и объемами внесенных органических удобрений (рис. 3).

Органические удобрения оказывают умеренное положительное влияние на урожайность. Однако их эффективность сильно зависит от региона, типа культуры и агротехнических практик [8, 10]. Для большинства исследуемых культур наблюдается слабая положительная корреляция (0,4-0,5). В Ставропольском и Краснодарском краях, а также Ростовской области корреляция для сахарной свеклы достигает средних значений (0,65).

Наибольшая корреляция между внесением органических удобрений и урожайностью овощей выявлена для Республики Крым и Астраханской области (0,7 и 0,8). Эти регионы характеризуются высокими применением удобрений и ролью агротехнических факторов. А вот отсутствие статистической значимости отмечено для Республики Дагестан и Чеченской Республики, где наблюдаются низкие объемы внесенных удобрений и высокие колебания урожайности агрокультур.

Стоит отметить, что влияние удобрений часто проявляется с задержкой в 1-2 года, особенно в отношении многолетних культур [9]. Например, в Ростовской области пик урожайности сахарной свеклы

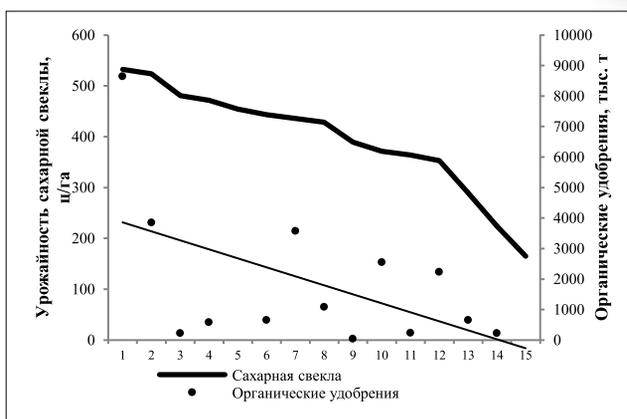


Рис. 3. Распределение выбранной группы регионов по урожайности сахарной свеклы и объемам внесенных органических удобрений в 2022 г. 1 – Адыгея; 2 – Калмыкия; 3 – Крым; 4 – Астраханская обл.; 5 – Дагестан; 6 – Ингушетия; 7 – Кабардино-Балкария; 8 – Северная Осетия-Алания; 9 – Марий Эл; 10 – Удмуртия; 11 – Пермский край; 12 – Кировская обл.; 13 – Самарская обл.; 14 – Ставропольский край; 15 – Краснодарский край; 16 – Саратовская обл.; 17 – Мордовия; 18 – Карачаево-Черкессия; 19 – Пензенская обл.; 20 – Татарстан; 21 – Ростовская обл.; 22 – Волгоградская обл.; 23 – Башкортостан; 24 – Ульяновская обл.; 25 – Нижегородская обл.; 26 – Чувашия; 27 – Оренбургская обл.; 28 – Чечня

Fig. 3. Distribution of selected regions of the Russian Federation by sugar beet yield and organic fertilizer application rates in 2022

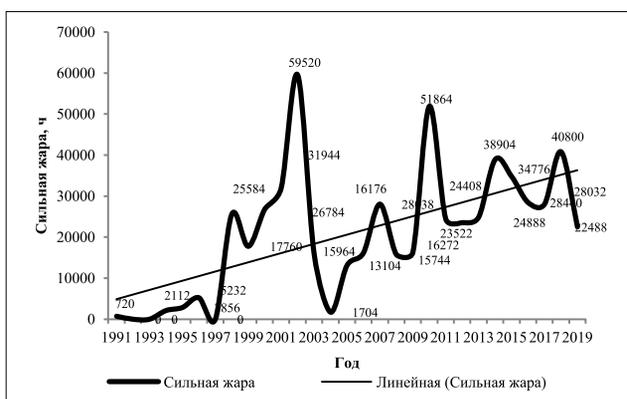


Рис. 4. Динамика продолжительности чрезвычайной пожароопасности в выбранной группе регионов РФ, часов в год [12]

Fig. 4. Dynamics of extreme fire hazard duration in selected regions of the Russian Federation, measured in hours per year [12]

пришелся на 2017-2018 гг. при существенном росте количества внесенных удобрений в 2015-2016 гг.

Изменения климатических параметров существенно сказываются на потребности в использовании минеральных и органических удобрений в сельском хозяйстве [11]. Последствия глобальных климатических изменений на территории южных регионов России проявляются в повышении температуры, учаще-

нии засух и изменении режима осадков [12, 13]. На *рисунке 4* показана возрастающая динамика продолжительности такого опасного погодного явления на территории выбранной группы регионов, как чрезвычайная пожароопасность: т.е. в условиях, при которых велика вероятность возгорания травы, торфяников и лесных массивов.

Значительное влияние на почву повышения температуры выражается в ускорении минерализации органического вещества, что улучшает доступность некоторых питательных веществ, либо в истощении органического слоя почвы. Засухи могут снизить эффективность применения минеральных удобрений, поскольку без достаточной влаги растениям сложно получать питательные вещества. Это обуславливает потребность в изменении методов внесения удобрений или использовании более устойчивых к засухе сортов сельскохозяйственных растений.

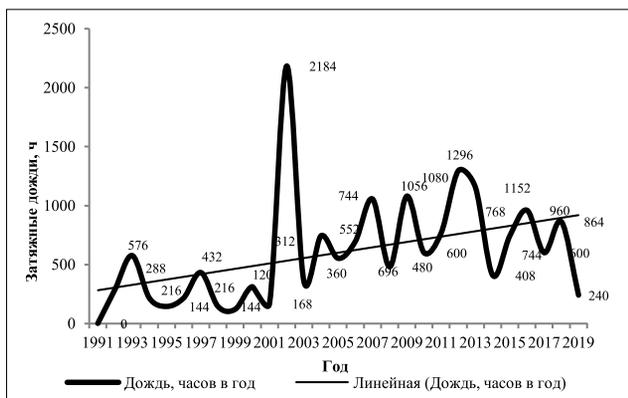


Рис. 5. Динамика продолжительности затяжных дождей в выбранной группе регионов РФ, ч/год

Fig. 5. Dynamics of prolonged rainfall duration in selected regions of the Russian Federation, measured in hours per year

Климатические риски связаны с изменением объемов и нестабильной динамикой осадков. В «Типовой перечень и критерии опасных метеорологических явлений» Росгидромета включено такое явление погоды, как сильный ливневый дождь, когда на протяжении не более 1 ч выпадает не менее 30 мм осадков. Краткосрочные сильные или затяжные дожди, прерывающие длительную засуху, все сильнее оказывают влияние на процесс выращивания сельскохозяйственных культур [8] (*рис. 5*).

Осадки на территории регионов Северо-Кавказского, Южного и Приволжского федеральных округов становятся более интенсивными, но менее частыми. Это может привести к вымыванию удобрений из почвы, особенно азотных и калийных, что потребует более точного расчета доз и времени внесения, использования медленно действующих форм удобрений.

Подобные климатические тенденции характерны для территорий других стран сельскохозяйственной специализации. Решение проблемы адаптации

аграрного производства к последствиям глобальных климатических изменений занимает одно из центральных мест в повестке дня мировой общественности. В рамках исследования был проведен патентный анализ существующих технико-технологических решений в области фертигации. По запросу «технология фертигации» во Всемирной базе данных интеллектуальной собственности (*World Intellectual Property Organization, WIPO*) было получено 723 результата (патента) за период с 2017 по 2025 г. Из них 208 патентов посвящены методам подготовки необходимых растворов удобрений и 367 патентов – техническому проектированию поливальных машин и установок. Остальные 148 патентов посвящены сопутствующим технологиям организации вертикальных ферм и прочим закрытым биосистемам, затрагивающим процесс фертигации. Более 70% запатентованных технико-технологических решений в данной информационной базе пришлось на Китай.

Обзор патентов по фертигации демонстрирует активное развитие технологий, направленных на повышение точности, автоматизацию и экологичность процессов орошения и внесения удобрений.

Большинство решений сосредоточено на интеграции *IoT*, датчиков почвы и климатических параметров для адаптивного управления. Рост количества запатентованных мобильных приложений и облачных платформ в целях мониторинга и управления соответствует мировому тренду цифровизации. Ряд патентов направлен на создание системы на основе данных из нескольких источников и машинного обучения, позволяющей оптимизировать полив и дозирование удобрений в режиме реального времени, снижать расход воды и химическую нагрузку [14, 15].

Ключевым трендом является использование автономных энергоустройств, таких как солнечные панели, что увеличивает устойчивость систем в удаленных районах. Значительное внимание уделяется предотвращению засорения системы путем контроля мутности воды и внедрения механизмов измельчения удобрений. Устройства капельного орошения модернизируются за счет антиблокировочных узлов и регулируемых распылителей, улучшающих равномерность распределения.

В целом, инновации в сельском хозяйстве направлены на повышение урожайности, минимизацию ручного труда и ресурсосбережение через умные технологии, создание устойчивых энергоисточников и точное управление агропараметрами [16].

Аналогичный запрос на портале Федеральной службы по интеллектуальной собственности Российской Федерации (Роспатент) показал наличие 11 отечественных патентных исследований за 30-летний период, четыре из которых на 01.01.2025 г. недействующие.



В отечественной базе данных зарегистрированы патенты на машины для подпочвенного внесения минеральных жидких удобрений (1998 г.); устройства для внесения при поливе водой микроэлементов, химических мелиорантов для улучшения почв с неблагоприятными физическими и химическими свойствами, гербицидов, пестицидов и макроудобрений в системах капельного орошения; различные виды дождевальных машин (2001, 2016, 2023 гг.); робот-пропольщик с функцией фертигации (2019 г.) и др.

Обзор российской патентной базы по фертигации продемонстрировал эволюцию технологий от механических систем к автоматизированным и интеллектуальным решениям [17]. К ключевым тенденциям при разработке таких решений относятся повышение точности, энергоэффективности, интеграция с цифровыми технологиями и экологическая безопасность [18].

Статистическая информация о наличии в отечественном сельском хозяйстве поливных установок и машин для осуществления фертигации весьма скудная [19]. На основе имеющихся данных Росстата проведен анализ динамики наличия в отрасли машин для внесения в почву жидких органических удобрений за 1990–2009 гг. С 2010 г. статистика по данным машинам не представлена. В годы государственных реформ существенно сократился технический ресурс, в первую очередь машин и оборудования [20]. В 1990 г. насчитывалось 41 916 машин для внесения в почву жидких органических удобрений. К 2009 г. их число сократилось до 4083, из них 1783 машины находились в южных регионах и Поволжье (43%).

В настоящее время предложение отечественного оборудования для фертигации на внутреннем рынке растет. Преимуществом российских производителей («Гидроинженеринг», «Агротех-гарант», «Аквагория» и пр.) является универсальность решений. Отечественные производители постепенно наращивают свое присутствие, обеспечивая до 27–32% предложения, что, однако, явно недостаточно для импортозамещения. Значительную долю на рынке сохраняют международные компании: *Netafim* (Израиль), мировой лидер в сфере капельного орошения, занимает около 30–35% российского рынка; на долю *Rain Bird* (США) и *Jain Irrigation* (Индия) суммарно приходится до 25–30%. Совместные российские предприятия с иностранным участием добавляют еще 5–7%.

Если рассматривать рынок по сегментам, то в оборудовании для фертигации (инжекторы, дозаторы, фильтры) иностранные производители лидируют с долей 75–80%. Российские компании обеспечивают около 20–25%, и их роль растет по мере реализации стратегии импортозамещения. В сфере услуг (проектирование, монтаж и обучение) отечественные производители более конкурентоспо-

собные (50–60% рынка), локализация сервиса дает им преимущество в скорости и адаптации под региональные условия.

На динамику рынка технологий фертигации значительное влияние оказывают несколько факторов. После 2022 г. многие сельхозпроизводители стали активнее переходить на российское оборудование ввиду санкционных ограничений, транспортно-логистических проблем с поставками запчастей и их удорожанием. Однако ключевым вызовом остается технологическое отставание от зарубежных аналогов в производстве высокоточных дозаторов и систем автоматизации. По прогнозам экспертов, к 2030 г. доля российских компаний на рынке фертигации может вырасти до 30–35% за счет расширения ассортимента. Кроме того, усиление климатических рисков, таких как засухи в южных регионах, подталкивает сельских производителей к внедрению технологий, сочетающих орошение и точное внесение удобрений, что открывает новые ниши для отечественных разработок.

Выводы. Подтвердили критическую роль технологий фертигации в обеспечении устойчивости сельского хозяйства России в условиях нарастающих климатических вызовов. Анализ данных за 2015–2022 гг. показал, что эффективность применения минеральных и органических удобрений существенно зависит от региональных особенностей. Выявлена зависимость между вносимыми объемами удобрений и урожайностью основных сельскохозяйственных культур, что подтверждает потенциал фертигации и указывает на доминирование климатических факторов.

Для повышения точности расчетов и определения факторов наибольшего влияния на урожайность тех или иных культур требуется углубленный многофакторный анализ в разрезе регионов, климатических и производственных параметров.

Климатические изменения усиливают необходимость адаптивного управления ресурсами. Ускоренная минерализация почв и риск вымывания удобрений требуют внедрения интеллектуальных систем, интегрирующих *IoT*, датчики почвы и прогнозные модели.

Патентный анализ выявил глобальный тренд на автоматизацию и цифровизацию процессов фертигации, однако доля российских разработок остается низкой. Несмотря на рост отечественного производства оборудования для точного земледелия, технологическое отставание сохраняется, что определяет необходимость государственной поддержки НИОКР в этой области и импортозамещения.

Прогнозируемый рост доли российских компаний возможен при условии развития локализованных решений, учитывающих региональную специфику. Для южных и приволжских регионов, наи-

более уязвимых с точки зрения аридизации, фертигация становится стратегическим инструментом минимизации потерь урожая. Успешная интеграция технологий требует разработки адресных программ поддержки сельхозтоваропроизводителей, включая обучение, субсидирование оборудо-

вания и создание инфраструктуры. Дальнейшее развитие фертигации в России должно базироваться на синтезе климатической адаптации, технологической модернизации и научно обоснованной аграрной политики, направленной на устойчивое управление ресурсами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК:

1. Туктаров Р.Б., Морозов М.И., Греков Д.А. SWOT-анализ внедрения технологий фертигации в процесс агропроизводства // *Региональные агросистемы: экономика и социология*. 2025. N1. С. 52-58. EDN: XCWWPS.
2. Bar-Yosef B. Advances in fertigation. *Advances in Agronomy*. 1999. Vol. 65. 1-77. DOI: 10.1016/S0065-2113(08)60910-4.
3. Singandhupe R.B., Rao G.G.S.N., Patil N.G., Brahmanand P.S. Fertigation studies and irrigation scheduling in drip irrigation system in tomato crop. *European Journal of Agronomy*. 2003. Vol. 19. N2. 327-340. DOI: 10.1016/S1161-0301(02)00063-8.
4. Wang Z. et al. Water and nitrogen use efficiency under fertigation in potato. *Agricultural Water Management*. 2009. Vol. 96. N11. 1583-1592. DOI: 10.1016/j.agwat.2009.06.012.
5. Айсанов Т.С., Романенко Е.С., Селиванова М.В. и др. Оценка эффективности фертигации при возделывании сортов яблони в саду интенсивного типа Центрального Предкавказья // *Вестник КрасГАУ*. 2022. N12. С. 42-48. DOI: 10.36718/1819-4036-2022-12-42-48.
6. Qin W. et al. Smart fertigation: A review of IoT-based solutions. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2020. Vol. 174. 105464. DOI: 10.1016/j.compag.2020.105464.
7. Imtiyaz M. et al. Response of tomato to irrigation and fertigation. *Agricultural Water Management*. 2000. Vol. 45. N2. 127-134. DOI: 10.1016/S0378-3774(00)00074-2.
8. Личман Г.И., Белых С.А., Марченко А.Н. Способы внесения удобрений в системе точного земледелия // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. N4. С. 4-9. DOI: 10.22314/2073-7599-2018-12-4-4-9.
9. Павлова В.Н., Богданович А.Ю., Семенов С.М. Об оценке степени благоприятности климата для культивирования зерновых, исходя из частоты сильных засух // *Метеорология и гидрология*. 2020. N12. С. 95-101. EDN: OMGXFF.
10. Жалнин Э.В., Зубина В.А. Обоснование типовых сельскохозяйственных территорий для разработки региональных систем машин // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. N2. С. 82-89. DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-2-82-89.
11. Дорохов А.С., Бельшклина М.Е. Агроклиматическая характеристика регионов нечерноземной зоны Российской Федерации и оценка пригодности для возделывания современных раннеспелых сортов сои // *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*. 2021. N3(55). С. 34-39. DOI 10.18286/1816-4501-2021-3-34-3.
12. Рухович О.В. Географическая сеть опытов с удобрениями – основа эффективного управления природно-ресурсным потенциалом агроэкосистем // *Плодородие почв России: состояние и возможности*. 2019. С. 99–103. EDN: EHYRXU.
13. Альт В.В., Исакова С.П. Планирование производства продукции растениеводства с применением цифровых технологий // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. N3. С. 12-19. DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-3-12-19.
14. Ju X.T., Kou C.L., Christie P. et al. Changes in the soil environment from excessive application of fertilizers and manures to two contrasting intensive cropping systems on the North China Plain. *Environmental Pollution*. 2007. Vol. 145. N2. 497-506. DOI: 10.1016/j.envpol.2006.04.017.
15. Chen Z. et al. The effects of different fertilization conditions on nitrate accumulation in spinach. *PLoS ONE*. 2017. Vol. 12. N1. e0168614. DOI: 10.1371/journal.pone.0168614.
16. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Дорохов А.С. и др. Современные технологии и техника для сельского хозяйства – тенденции выставки AGRITECHNIKA 2019 // *Тракторы и сельхозмашины*. 2020. N6. С. 28-40. DOI: 10.31992/0321-4443-2020-6-28-40.
17. Старовойтов С.И., Ценч Ю.С., Коротченя В.М., Личман Г.И. Технические системы цифрового контроля качества обработки почвы // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. N1. С. 16-21. DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-1-16-21
18. Дорохов А.С., Старостин И.А., Ещин А.В. Перспективы развития методов и технических средств защиты сельскохозяйственных растений // *Агроинженерия*. 2021. N1(101). С. 26-35. DOI: 10.26897/2687-1149-2021-1-26-35.
19. Ценч Ю.С., Косенко В.В., Шаров В.В. Эволюция конструкций гусеничных тракторов общего назначения // *Тракторы и сельхозмашины*. 2022. Т. 89. N3. С. 155-166. DOI: 10.17816/0321-4443-109676.
20. Пунинский В.С. Система машин для комплексной механизации мелиоративных работ // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2017. N 2. С. 43-48. DOI 10.22314/207375992017.2.4348.

REFERENCES

1. Tuktakov R.B., Morozov M.I., Grekov D.A. SWOT Analysis of implementation of fertigation technologies in agricultural production. *Regional Agrosystems: Economics and Sociology*. 2025. N1. 52-58 (In Russian). EDN: XCWWPS.
2. Bar-Yosef B. advances in fertigation. *Advances in Agronomy*. 1999. Vol. 65. 1-77 (In English). DOI: 10.1016/S0065-2113(08)60910-4.
3. Singandhupe R.B. et al. Fertigation studies and irrigation

- scheduling in drip irrigation system in tomato crop. *European Journal of Agronomy*. 2003. Vol. 19. N2. 327-340 (In English). DOI: 10.1016/S1161-0301(02)00063-8.
4. Wang Z. et al. Water and nitrogen use efficiency under fertigation in potato. *Agricultural Water Management*. 2009. Vol. 96. N11. 1583-1592 (In English). DOI: 10.1016/j.agwat.2009.06.012.
 5. Aysanov T.S., Romanenko E.S., Selivanova M.V. et al. Fertigation efficiency estimation in cultivating apple varieties in the intensive type garden of the Central Ciscaucasia. *Bulliten KrasSAU*. 2022. N12. 42-48 (In Russian). DOI: 10.36718/1819-4036-2022-12-42-48.
 6. Qin W. et al. Smart fertigation: a review of IoT-based solutions. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2020. Vol. 174. 105464 (In English). DOI: 10.1016/j.compag.2020.105464.
 7. Imtiyaz M. et al. Response of tomato to irrigation and fertigation. *Agricultural Water Management*. 2000. Vol. 45. N2. 127-134 (In English). DOI: 10.1016/S0378-3774(00)00074-2.
 8. Lichman G.I., Belykh S.A., Marchenko A.N. Methods of fertilizer application in the precision farming system. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2018. Vol. 12. N4. 4-9. (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2018-12-4-4-9.
 9. Pavlova V.N., Bogdanovich A.Yu., Semenov S.M. Assessment of climate favorability for the grain cultivation based on the frequency of severe droughts. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2020. N12. 95-101 (In Russian). EDN: OMGXFF.
 10. Zhalinin E.V., Zubina V.A. Justification of typical agricultural territories for the development of regional machine systems // *Agricultural Machinery and Technologies*. 2022. Vol. 16. N2. 82-89 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-2-82-89.
 11. Dorokhov A.S., Belyshkina M.E. Agroclimatic characteristics of regions of the non-black soil zone of the Russian Federation and suitability estimation for cultivation of modern early soybean varieties. *Vestnik of Ulyanovsk State Agricultural Academy*. 2021. N3(55). 34-39 (In Russian). DOI: 10.18286/1816-4501-2021-3-34-39.
 12. Rukhovich O.V. Geographical network of fertilizer experiments as a basis for agroecosystem resource management. *Soil Fertility in Russia: State and Prospects*. 2019. 99-103 (In Russian). EDN: EHYRXU.
 13. Alt V.V., Isakova S.P. Planning of crop production using digital technologies. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2022. Vol. 16. N3. 12-19 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-3-12-19
 14. Ju X. et al. Changes in the soil environment from excessive application of fertilizers and manures to two contrasting intensive cropping systems on the north china plain. *Environmental Pollution*. 2007. Vol. 145. N2. 497-506 (In English). DOI: 10.1016/j.envpol.2006.04.017.
 15. Chen Z. et al. The effects of different fertilization conditions on nitrate accumulation in spinach. *PLoS ONE*. 2017. Vol. 12. N1. e0168614 (In English). DOI: 10.1371/journal.pone.0168614.
 16. Izmailov A.Yu., Lobachevsky Ya.P., Dorokhov A.S. et al. Modern technologies and equipment for agriculture - trends at the AGRITECHNIKA 2019 exhibition. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2020. N6. 28-40 (In Russian). DOI: 10.31992/0321-4443-2020-6-28-40.
 17. Starovoytov S.I., Tsench Yu.S., Korotchenya V.M., Lichman G.I. Technical systems for digital soil quality control. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2020. Vol. 14. N1. 16-21 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-1-16-21.
 18. Dorokhov A.S., Starostin I.A., Eschin A.V. Development prospects for methods and technical means of farm crop protection. *Agricultural Engineering*. 2021. N1 (101). 26-35 (In Russian). DOI: 10.26897/2687-1149-2021-1-26-35.
 19. Tsench Yu.S., Kosenko V.V., Sharov V.V. The evolution of design of general purpose tracked tractors. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2022. Vol. 89. N3. 155-166 (In Russian). DOI: 10.17816/0321-4443-109676.
 20. Puninskiy V.S. Machine system for comprehensive mechanization of land reclamation works. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2017. N2. 43-48. (In Russian). DOI: 10.22314/207375992017.2.4348.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Акпасов А.П., Туктаров Р.Б. — существенный вклад в замысел исследования, критический пересмотр в части значимого интеллектуального содержания, окончательное одобрение варианта статьи для опубликования; Морозов М.И., Греков Д.А., Кадомцева М.Е. — сбор, анализ и интерпретация данных, дизайн исследования. Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Статья поступила в редакцию
Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on
The paper was accepted for publication on

01.08.2025
22.10.2025

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Akpasov A.P., Tuktarov R.B. — substantial contribution to the conception of the study, critical revision of the significant intellectual content, final approval of the article version to be published. Morozov M.I., Grekov D.A., Kadomtseva M.E. — data collection, analysis and interpretation, study design. The authors read and approved the final manuscript.



Внедрение коллаборативной робототехники для сбора плодовой продукции

Мадин Артурович Шереужев,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: shereuzhev@gmail.com;

Артур Изнаурович Дышеков,
кандидат технических наук, ведущий инженер,
e-mail: a.i.dyshekov@gmail.com;

Федор Владимирович Девяткин,
инженер,
e-mail: feodor-dev@ya.ru

МГТУ «СТАНКИН», Москва, Российская Федерация

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект FSFS-2024-0012). MSC: 68T40; 93C85.

Реферат. Коллаборативная робототехника в сельском хозяйстве ориентирована на автоматизацию трудоемких процессов. Коллаборативные мультиагентные робототехнические системы (КМРТС), в отличие от традиционных автономных систем, предполагают активное взаимодействие между роботами и операторами-людьми, что требует разработки новых методов координации, адаптации и обеспечения безопасности в условиях неопределенности и динамично изменяющейся среды. *(Цель исследования)* Разработка теоретических и прикладных подходов к моделированию поведения и управлению коллаборативными мультиагентными робототехническими системами, направленных на обеспечение эффективного распределения задач, координации действий агентов и их безопасного взаимодействия с людьми при выполнении операций по сбору урожая плодовой продукции. *(Материалы и методы)* Для достижения поставленных целей использовались методы теории игр, машинного обучения и управления с учетом рисков. Построена математическая модель, описывающая взаимодействие агентов с учетом вероятностной природы среды и наличия оператора. Валидация предложенных решений осуществлялась посредством численного моделирования, а также на основе данных, которые получены в условиях экспериментального полигона, имитирующего реальные сельскохозяйственные сценарии. *(Результаты и обсуждение)* Разработаны алгоритмы координации, адаптации и перераспределения задач между агентами коллаборативной мультиагентной робототехнической системой, обеспечивающие устойчивость к ошибкам сенсорного восприятия, задержкам передачи данных и внешним возмущениям, характерным для сельскохозяйственной среды. Особое внимание уделено адаптации поведения агентов в ответ на действия операторов-людей, включая возможность приоритизации задач и контекстно-зависимого изменения стратегии взаимодействия. Симуляционные эксперименты продемонстрировали повышение производительности системы за счет более равномерного распределения нагрузки между роботами, уменьшения числа конфликтов при выполнении совместных задач и сокращения простоев. Также зафиксировано улучшение показателей безопасности, в частности, снижение вероятности столкновений и некорректных реакций на присутствие человека в рабочей зоне. *(Выводы)* Разработанные модели и алгоритмы могут быть использованы для построения интеллектуальных коллаборативных мультиагентных робототехнических систем, способных к адаптивному и безопасному взаимодействию в условиях сельскохозяйственного производства, что способствует росту эффективности автоматизированного сбора урожая и снижению зависимости от человеческого труда.

Ключевые слова: коллаборативная робототехника, мультиагентные системы, взаимодействие человека и робота, сельскохозяйственная робототехника, распределение задач, безопасность.

■ **Для цитирования:** Шереужев М.А., Дышеков А.И., Девяткин Ф.В. Внедрение коллаборативной робототехники для сбора плодовой продукции // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2025. Т. 19. №4. С. 66-74. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-4-66-74. EDN:IITUFB.

Scientific article

Adoption of Collaborative Robotics in Fruit Harvesting

Madin A. Shereuzhev,
Ph.D.(Eng.), associate professor,
e-mail: shereuzhev@gmail.com;

Artur I. Dyshekov,
Ph.D.(Eng.), lead engineer,
e-mail: a.i.dyshekov@gmail.com;

Fedor V. Devyatkin,
engineer,
e-mail: feodor-dev@ya.ru

Moscow State University of Technology "STANKIN", Moscow, Russian Federation

This research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Grant No. FSFS-2024-0012).

Abstract. Collaborative robotics in agriculture is designed to automate labor-intensive processes. In contrast to traditional autonomous systems, collaborative multi-agent robotic systems require active interaction between robots and human operators. This interaction creates the need for new methods for coordination, adaptation, and safety assurance in uncertain and dynamically changing environments. *(Research purpose)* The study aims to develop both theoretical and practical approaches to modeling the behavior and control of collaborative multi-agent robotic systems. The primary objective is to ensure efficient task allocation, coordinated agent behavior, and safe human-robot interaction during fruit harvesting operations. *(Materials and methods)* To achieve these objectives, the study employed methods from game theory, machine learning, and risk-aware control. A mathematical model was developed to describe the interactions among agents, incorporating the probabilistic nature of the environment and the involvement of a human operator. The proposed solutions were validated through a combination of numerical simulations and experimental data collected from a testbed replicating real-world agricultural scenarios. *(Results and discussion)* Algorithms were developed to enable coordination, adaptation, and dynamic task redistribution within the collaborative multi-agent robotic system. These algorithms demonstrated robustness against sensor inaccuracies, communication delays, and external disturbances typical of agricultural settings. Special attention was given to the system's ability to adapt to human operator inputs, including task prioritization and context-sensitive interaction strategies. Simulation results showed enhanced system performance, characterized by more balanced task distribution among robots, reduced conflict during joint operations, and minimized idle time. Safety metrics also improved, including a reduction in collision risks and fewer incorrect responses to the presence of human operators in the work area. *(Conclusions)* The developed models and algorithms provide a foundation for the design of intelligent collaborative multi-agent robotic systems capable of adaptive and safe interaction in agricultural production. Their application can enhance the efficiency of automated harvesting processes while reducing reliance on manual labor.

Keywords: collaborative robotics, multi-agent systems, human-robot interaction, agricultural robotics, task allocation, safety.

■ For citation: Shereuzhev M.A., Dyshekov A.I., Devyatkin F.V. Adoption of collaborative robotics in fruit harvesting. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N4. 66-74 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-4-66-74. EDN: IITUFB.

Дефицит рабочей силы, рост затрат и требования в области экологической устойчивости делает автоматизацию и робототехнические системы все более востребованными в сельском хозяйстве. Перспективным направлением является применение коллаборативных робототехнических систем, где роботы и люди совместно выполняют операции, например сбор плодов. Ключевая проблема состоит в обеспечении безопасного и эффективного взаимодействия человека и робота в динамичной среде. Современные исследования по распределению задач, координации и адаптации агентов постепенно переходят к практическим решениям. При работе рядом с людьми должно поддерживаться динамическое планирование и управление мультиагентной системой (МАС).

Коллаборативная робототехника ориентирована на работу роботов и людей в одном пространстве и особенно актуальна для автоматизации трудоемких процессов. В обзоре рассматриваются ключевые исследования по групповому применению роботов в составе МАС.

МАС активно применяются в распределенных системах. В сельском хозяйстве роботы могут одновременно выполнять сбор и транспортировку плодов или подзарядку. В работах [1], Garapati K. et al. (ROBOT 2017), Lujak M. et al. демонстрируется эффективность распределенных алгоритмов в условиях динамического изменения задач.

Создание коллаборативных мультиагентных робототехнических систем (КМРТС) особенно важно для безопасной работы рядом с людьми. Для коадаптации в реальном времени роботы используют прогнозирование поведения человека и онтологические базы знаний [2]. В обзоре [3] подчеркивается значимость моделей предсказания поведения людей для повышения безопасности и эффективности взаимодействия.

Управление роботами в условиях неопределенности требует учета погодных факторов, степени созревания плодов и поведения людей. В работах [4], Oguz O.S. et al. (IEEE RO-MAN, 2017), Hu H., Fisac J.F. (WAFR 2022) предлагаются методы стохастического управления, позволяющие учитывать вероятностные сценарии изменений среды.

Мультиагентные системы в сельском хозяйстве также рассматриваются в работах [5-7], где показана эффективность распределенных алгоритмов в динамических условиях. КМРТС требуют предсказания поведения человека и коадаптации, поддерживаемых онтологическими моделями [8]. Подтверждается важность таких моделей для безопасного взаимодействия в ограниченном пространстве [9].

Методы стохастического управления [10-12] позволяют учитывать внешние факторы и неопределенность. Адаптивные модели управления, включая биоинспирированные нейронные сети, обсуждаемые в [13-15], повышают способность роботов предсказывать изменения поведения людей и среды.

Развитие цифровых двойников открывает возможности для моделирования взаимодействия и адаптации роботов к динамике внешних условий [16]. В работах [17, 18] подчеркивается значимость кооперативных роботов для сельского хозяйства и их способности адаптироваться к изменениям. Обзор методов распределения задач представлен в *таблице 1*.

Основным нерешенным вопросом остается учет неопределенности, связанный с наличием людей в рабочей зоне робота, и адаптация сценария решения назначенной задачи коллаборативным сельскохозяйственным роботом к изменениям окружающей среды с учетом поведения людей.

Цель исследования: формализовать основные фундаментальные вопросы взаимодействия групп роботов и людей в сельскохозяйственном пространстве для того, чтобы в дальнейшем предложить новые модели и алгоритмы, которые позволят решать указанные задачи с учетом неопределенностей среды и взаимодействий между агентами.

Материалы и методы. Для достижения поставленных целей использовались методы теории игр, машинного обучения и управления с учетом рисков.

Математическая модель коллаборативной мультиагентной робототехнической системы для сбора плодовой продукции

Одним из ключевых аспектов функционирования коллаборативной мультиагентной системы в сельском хозяйстве является эффективное распределение задач между роботами и людьми с учетом их возможностей. Разные агенты (роботы и люди) могут обладать разной производительностью, выполнять различные типы задач и иметь разные ограничения, что должно быть учтено в модели управления системой.

Для описания динамики как роботов, так и людей в мультиагентной системе введем вектор, упрощенные состояния $x_i(t)$ для каждого агента i (где $i \in \{1, \dots, N\}$, N – общее число агентов, включая роботов и людей), который включает позицию, скорость и ориентацию в пространстве:

$$x_i(t) = [p_i(t), v_i(t), \theta_i(t)], \quad (1)$$

где $p_i(t)$ – позиция агента; $v_i(t)$ – скорость; $\theta_i(t)$ – ориентация в момент времени t .

Модель управления для каждого робота описывается стандартным уравнением движения:

$$\begin{aligned} \dot{x}_i(t) &= f_i(x_i(t), u_i(t)) + w_i(t), \\ x_i(0) &= x_i^0, \end{aligned} \quad (2)$$

где f_i – функция динамики для агента i ; $u_i(t)$ – управляющее воздействие; $w_i(t)$ – шум (или неопределенность) в динамике агента, описывающий возможные отклонения в движении; x_i^0 – набор начальных состояний.

Каждому агенту i назначается набор задач для выполнения в рамках мультиагентной системы. Введем бинарную переменную a_{ij} , которая принимает значение 1, если задача j назначена агенту i , и 0 – в противном случае. Матрица (4) распределения задач $A = [a_{ij}]$ подчиняется следующим ограничениям:

$$\sum_{i=1}^N a_{ij} = 1 \quad \forall j \in \{1, \dots, M\}, \quad (3)$$

где M – общее число задач.

Это означает, что каждая задача может быть назначена только одному агенту.

Целевая функция, которая должна минимизироваться, включает затраты на выполнение задач и время выполнения:

$$J = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M a_{ij} C_{ij}(x_i(t), u_i(t), T_j), \quad (4)$$

где c_{ij} – функция стоимости выполнения задачи j агентом i , зависящая от его состояния $x_i(t)$, управляющих воздействий $u_i(t)$ и времени выполнения задачи τ_j .

Для учета неопределенностей, связанных с динамикой агентов и изменениями внешней среды (например, погодные условия, непредсказуемые действия людей), вводится вероятностная модель. Пусть $P(e_k | x_i(t), u_i(t))$ – вероятность возникновения события e_k (например, столкновения с человеком или препятствием) при текущем состоянии $x_i(t)$ и управляющем воздействии $u_i(t)$. Таким образом, управление системой должно минимизировать не только время и затраты, но и риск возникновения нежелательных ситуаций:

$$J_{total} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M a_{ij} \cdot C_{ij}(x_i(t), u_i(t), T_j) + \lambda \sum_{k=1}^K P(e_k), \quad (5)$$

где λ – весовой коэффициент, определяющий значимость учета рисков; K – количество возможных неблагоприятных событий.

Для координации работы агентов, включая людей, вводится общая цель, которую необходимо дос-

Таблица 1

Table 1

ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАДАЧ / OVERVIEW OF EXISTING TASK ALLOCATION METHODS		
Метод	Сценарий	Ограничения
Игровая теория (Garapati K. et al. ROBOT 2017 Conference Proceedings)	Многоагентное распределение задач в охранных миссиях	Ограниченное масштабирование Ограниченные знания агентов
Потенциальные игры [1]	Динамическое распределение задач	Требуется глобальная информация о состоянии
Координация агрироботов (Lujak M. et al. ATT 2022)	Сельское хозяйство	Зависимость от инфраструктуры и моделей
Систематический обзор [3]	HRI в сельском хозяйстве	Обзорная работа Отсутствие конкретных алгоритмов
Стохастическое планирование (Oguz O.S. et al. IEEE RO-MAN, 2017)	Взаимодействие с человеком	Высокие вычислительные затраты
Моделирование вероятностей и адаптация [4]	Координация HRI с изменчивыми навыками	Низкая предсказуемость поведения человека
Dual control, активное обучение (Hu H., Fisac J.F. WAFR 2022)	Взаимодействие с человеком	Сложность выполнения в реальном времени
Оценка позиций [20]	Роботы в кооперативных ячейках	Низкая точность при окклюзии
Мультифункциональный подход [5]	Автономные наземные роботы	Отсутствует адаптация к динамике
Beetle antennae search [6]	Умный дом + HRI	Эвристический характер, отсутствие обучения
Гетерогенные кооперативные роботы [7]	Сбор и мониторинг насекомых	Зависимость от связи между роботами
Управление усилием захвата [8]	Кооперативные манипуляторы	Требует точной калибровки силы
Обзор методов кооперации [9]	Транспортировка объектов	Нет конкретной реализации
Нечеткая логика [10]	Адаптивные кооперативные роботы	Высокая зависимость от настроек правил
Framework дизайна [11]	Производственные линии	Не рассматривает автономию
Кооперативная кладка [12]	Роботизированное строительство	Сложность настройки синхронности
Нейросеть, вдохновленная биологией [13]	Умный дом	Ограниченная генерализация
Машинное обучение + IoT [14]	Smart manufacturing	Высокая сложность интеграции
ROS 2 Toolbox [15]	Прототипирование в кооперации	Требуется опыт в ROS 2
Digital twin frame work [16]	Кооперативные роботы	Высокая стоимость и сложность внедрения
Онтологические базы знаний [2]	Коадаптация поведения роботов и людей в агропроцессах	Требует развертывания онтологической модели
Биоинспирированные нейронные сети [13, 14]	Предсказание поведения человека и адаптация роботов в агросреде	Требует обучения на агроспецифичных данных
Модели прогнозирования поведения человека [3, 9]	Адаптация действий агроботов к индивидуальным особенностям операторов	Требует калибровки под конкретные агрозадачи

тичь всей системе. Это может быть минимизация общего времени сбора урожая

$$\min_{u_i(t)} \sum_{i=1}^N J_{total}, \quad (6)$$

при этом учитываются ограничения по безопасности и эффективности работы в мультиагентной среде и каждый агент должен взаимодействовать с другими агентами, соблюдая ограничения:

$$g(x_i(t), x_k(t)) \leq 0 \quad \forall i \neq k, \quad (7)$$

где $g(x_i(t), x_k(t))$ – функция, задающая ограничения на минимальное безопасное расстояние между агентами.

Изменим модель распределения задач с учетом возможностей агентов. Каждому агенту i (роботу или человеку) назначается задача j из набора доступных задач. Для этого вводится матрица распре-

деления задач $A = [a_{ij}]$, если задача j назначена агенту i , и $a_{ij} = 0$ в противном случае.

Роботы и люди имеют разные возможности выполнения задач. Так, роботы могут выполнять задачи по сбору плодов и транспортировке урожая, но их действия могут ограничиваться, например, уровнем заряда батареи или точностью манипуляций. При этом люди могут выполнять задачи, требующие более высокой точности или сложного принятия решений (например, выбор зрелых плодов вручную), но их производительность может снижаться из-за усталости.

Функция стоимости $C_{ij}(x_i(t), u_i(t), t_j)$ зависит от текущего состояния агента i (местоположения, уровня заряда, др.), управляющих воздействий $u_i(t)$ и времени выполнения задачи t_j . Функция стоимости может быть различной для роботов и людей,

чтобы учитывать их индивидуальные особенности и возможности:

$$C_{ij} = \begin{cases} C_{robot}(x_i(t), u_i(t), t_j), & \text{если агент } i - \text{ робот} \\ C_{human}(x_i(t), u_i(t), t_j), & \text{если агент } i - \text{ человек.} \end{cases} \quad (8)$$

Система управления должна учитывать следующие ограничения:

- по уникальности выполнения задач:

$$\sum_{j=1}^M a_{ij} = 1 \quad \forall j \in \{1, \dots, M\}. \quad (9)$$

Каждая задача должна быть назначена только одному агенту;

- по производительности роботов:

$$a_{ij} \cdot P_{robot} \leq \text{максимальная нагрузка на робота } i, \quad (10)$$

где P_{robot} – производительность робота, зависящая от его текущего состояния (уровня заряда батареи, доступности пр.);

- по количеству задач для человека:

$$\sum_{j=1}^M a_{ij} \leq P_{human}(t), \quad (11)$$

где $P_{human}(t)$ – производительность человека, зависящая от его состояния (например, усталости или времени работы).

В алгоритмах распределения задач между роботами и людьми, включая методы теории игр и аукционов, каждый агент делает ставку на выполнение задачи, исходя из своей производительности и текущего состояния, а задача назначается агенту с наилучшими условиями для выполнения. Кроме расчета стоимости универсальными методами в виду динамичности среды могут возникать непредвиденные факторы, которые являются индивидуальными для каждого робота и человека.

При использовании алгоритмов типа аукцион функция ставки σ для робота i при выполнении задачи j может быть описана как:

$$\sigma_i(j) = C_{robot}(x_i(t), u_i(t), t_j) + \lambda \cdot \Delta t_j^i, \quad (12)$$

где Δt_j^i – время выполнения роботом i задачи j .

Для людей аналогичная функция учитывает их физическое состояние и усталость как индивидуальный фактор:

$$\sigma_i(j) = C_{human}(x_i(t), u_i(t), t_j) + \alpha \cdot \omega_j^i, \quad (13)$$

где ω_j^i – фактор усталости выполнения человеком i задачи j .

Целью алгоритма является минимизация суммарных затрат по всем агентам, что включает временные затраты и риски сбоев:

$$\min \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M a_{ij} C_{ij}(x_i(t), u_i(t), \Delta t_j). \quad (14)$$

Поскольку в реальных условиях могут возникнуть различные неопределенности (например, погодные изменения, непредсказуемое поведение людей), то управление системой учитывает стохастическую природу среды. Вероятность успешного выполнения задачи агентом зависит от текущего состояния среды и характеристик агента:

$$P(e_k | x_i(t), u_i(t)) = f(x_i(t), u_i(t), \delta(t)), \quad (15)$$

где $\delta(t)$ – условия среды.

Это позволяет системе динамически адаптировать распределение задач и координацию в зависимости от изменения условий работы. Формализуем метод динамического планирования траекторий, который адаптируется к изменениям в окружении. Пусть $\tau_i(t)$ – это траектория движения агента i . Оптимальная траектория должна минимизировать затраты на перемещение C_{motion} , избегая при этом коллизий с другими агентами:

$$\min_{\tau_i(t)} \int_0^T C_{motion}(x_i(t), u_i(t)) dt, \quad (16)$$

при условии

$$d(x_i(t), x_k(t)) \geq d_{min} \quad \forall i, k, \quad i \neq k, \quad (17)$$

где $d(x_i(t), x_k(t))$ – расстояние между агентами; d_{min} – минимальное допустимое расстояние для предотвращения столкновений.

Многоуровневая архитектура

Архитектура системы управления робота-агента основывается на многоуровневой модели (рис. 1), в которой каждый уровень отвечает за определенный набор задач и процессов.

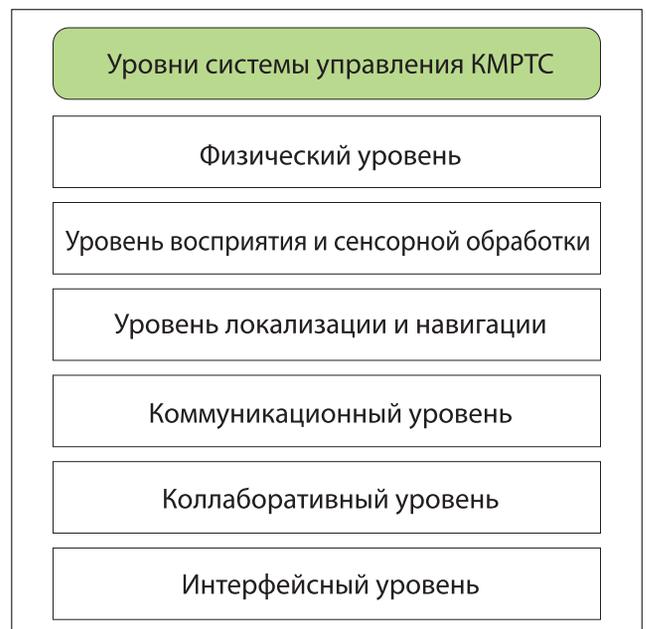


Рис. 1. Уровни системы управления коллаборативных мультиагентных робототехнических систем
Fig. 1. Control system levels of a collaborative multi-agent robotic system

Основу восприятия среды роботом составляют данные, поступающие с разнообразных сенсоров [19]. Для решения задачи сбора плодов необходимо обеспечить робота системами, которые смогут точно определять положение плодов, их зрелость и оценивать возможные препятствия, включая людей, в рабочем пространстве [20].

Основными модулями сенсорной системы являются:

- камеры *RGB* и глубинные камеры, используемые для распознавания плодов, оценки их размеров, а также для детектирования людей и объектов;
- сканирующий лазерный дальномер, обеспечивающий трехмерное сканирование окружающей среды, что позволяет строить карту местности и точно определять расстояния до объектов;
- ультразвуковые сенсоры, применяемые для предотвращения столкновений и обеспечения безопасности при работе в непосредственной близости с людьми.

Информация с сенсоров обрабатывается в режиме реального времени, что позволяет системе постоянно обновлять представление о среде и принимать решения на основе актуальных данных. Этот уровень критически важен для безопасного взаимодействия с людьми.

Локализация и навигация

Для успешного выполнения задач роботы должны уметь точно определять свое положение в рабочей зоне и безопасно перемещаться к целям, например, плодам или зонам сбора (Hu H., Fisac J.F. WAFR 2022). Основой навигации является технология *SLAM* (*Simultaneous Localization and Mapping*), которая позволяет роботу одновременно строить карту местности и определять на ней свое местоположение.

Уравнения навигации описываются следующим образом:

$$p_r(t+1) = p_r(t) + v_r(t) \cdot \Delta t, \quad (18)$$

где $p_r(t)$ – текущее положение робота; $v_r(t)$ – скорость робота; Δt – временной шаг.

На основе данных о скорости и положении робота система локализации корректирует его траекторию, минимизируя риск столкновений с людьми или другими объектами.

Планирование задач в коллаборативной мультиагентной системе осуществляется на основе алгоритмов распределения и координации [21, 22], (Arturovich S.M. et al. AIP Conference Proceedings). В зависимости от текущей ситуации роботу может быть назначена задача по сбору плодов в определенной зоне, транспортировке собранного урожая к точке хранения или выполнению вспомогательных действий, например, подзарядки других роботов. Процесс планирования формализуется через целевую функцию, минимизирующую общее вре-

мя выполнения задач и затраты ресурсов, что позволяет системе динамически адаптироваться к изменениям среды и задач посредством как центрального управления, так и распределенных механизмов.

Экспериментальные исследования

Проведены серии симуляционных испытаний в *Gazebo* (рис. 2), направленные на проверку распределения задач, устойчивости алгоритмов и общей производительности мультиагентной системы в динамических условиях.

В эксперименте использовались три типа специализированных роботов:

- роботы-сборщики: оборудованы техническим зрением и манипуляторами для сбора плодов. Ограничены по времени автономной работы, требуют регулярной подзарядки;
- роботы-транспортировщики: осуществляют транспортировку собранных плодов к местам хранения;
- энергетические роботы: выполняют функцию автономной подзарядки сборщиков в рабочей зоне.

В процессе подготовки симуляции были реализованы следующие модели и взаимодействия (рис. 3):

- объектная модель дерева с плодами;

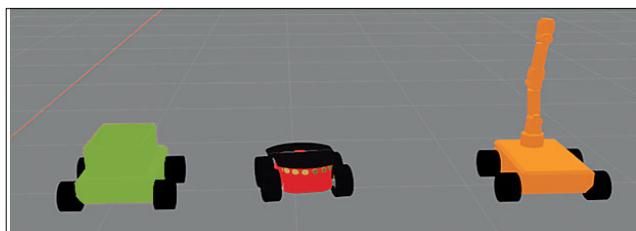


Рис. 2. Модели роботов-агентов в симуляционной среде: сборщик (оранжевый робот), транспортировщик (зеленый) и энергетический робот (красный)

Fig. 2. Robot agent models in the simulation environment: the harvester (orange), the transporter (green), and the energy robot (red)

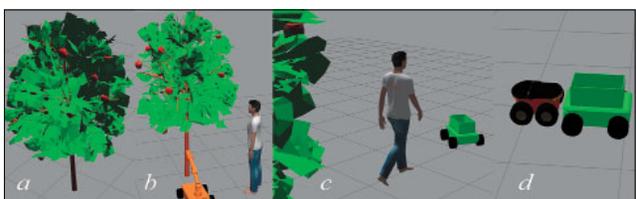


Рис. 3. Виртуальные модели агентов в симуляторе: сборщик (оранжевый), транспортировщик (зеленый), энергетический робот (красный); а – модель дерева с плодами; б – взаимодействие человека и робота; с – транспортировщик избегает человека; д – процесс виртуальной подзарядки

Fig. 3. Virtual models of agents in the simulator: the harvester (orange), the transporter (green), the energy robot (red). a – tree model with fruits; b – human-robot interaction; c – the transporter avoiding the human; d – virtual recharging process

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ / COMPARATIVE PERFORMANCE INDICATORS		
Показатель	Предложенный метод	Базовый метод
Среднее время сбора с одного дерева, мин	8,5 ± 0,4	12,3 ± 0,7
Эффективность распределения задач, %	92 ± 2	68 ± 4
Среднее время простоя сборщика, мин	0,8 ± 0,2	2,5 ± 0,4
Точность распознавания плодов, %	85 ± 3	72 ± 5
Количество инцидентов столкновений	0	1
Успешность завершения задач в плохих условиях, %	90 ± 2	65 ± 5

- взаимодействие человека и робота в процессе сбора;
- маневры робота-транспортировщика при обходе человека;

- виртуальная подзарядка транспортировщика энергетическим роботом.

Эксперименты проводились в саду с объектами, внешний вид которых выглядит как деревья с плодами. Взаимодействие людей и роботов проходило в следующих условиях:

- количество агентов: три робота (сборщик, транспортировщик и энергетический робот) и два человека;

- погодные условия: имитация капель дождя и ухудшение видимости через зашумление данных с датчиков;

- освещенность: различные уровни освещения влияли на качество работы технического зрения;

- выборка: пять разных деревьев с различной плотностью плодов;

- число итераций: каждая серия экспериментов повторялась не менее 10 раз для повышения статистической достоверности.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнительный базовый метод. Для оценки эффективности предложенной архитектуры проведены сравнительные эксперименты с базовым методом централизованного планирования без коадаптации:

- в базовом методе задачи распределялись статически без учета изменений окружающей среды и доступности агентов;

- в предложенной архитектуре применялось динамическое перераспределение задач и коадаптация поведения агентов.

Система показала способность адаптироваться к изменениям внешних условий (*табл. 2*). Динамическое распределение задач позволило увеличить эффективность системы на 30% по сравнению с базовым сценарием без адаптации. Виртуальные эксперименты подтвердили устойчивость системы к изменяющимся условиям, включая снижение освещенности и имитацию дождя. Энергетические роботы обеспечили непрерывную работу сборщиков, минимизируя простой.

Адаптивность и устойчивость системы. При ухудшении внешних условий (например, снижение освещенности) система технического зрения автоматически подстраивалась за счет переобучения параметров, что позволило повысить точность на 20% в виртуальных испытаниях. В виртуальных условиях система перераспределяла задачи в зависимости от доступности агентов и окружающей среды, что позволило сохранить высокую общую эффективность.

Выводы. Симуляционные и полевые эксперименты продемонстрировали работоспособность и высокую адаптивность предложенной архитектуры управления коллаборативной мультиагентной системой. В условиях неопределенности система успешно справлялась с задачами, обеспечивала надежное взаимодействие между агентами и сохраняла безопасность людей и роботов. Полученные результаты подтверждают потенциал интеграции таких систем в реальные аграрные процессы для повышения эффективности сбора урожая и снижения зависимости от погодных и человеческих факторов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Wu H., Shang H. Potential game for dynamic task allocation in multi-agent system. *ISA Transactions*. 2020. Vol. 102. 208-220. DOI: 10.1016/j.isatra.2020.03.004.
2. Шереужев М.А., Пак Л.А., Карасев П.Д., Винокуров А.О. Формализация рабочего пространства и онтология технологического процесса для выполнения технологических работ коллаборативной робототехнической ячейкой // *Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН*. 2022. № (110). С. 134-143. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-6-110-134-143.
3. Benos L., Moysiadis V., Kateris D. et al. Human-robot interaction in agriculture: a systematic review. *Sensors*. 2023. Vol. 23. N15. 6776. DOI: 10.3390/s23156776.
4. Liu R., Natarajan M., Gombolay M.C. Coordinating human-robot teams with dynamic and stochastic task proficiencies. *ACM Transactions on Human-Robot Interaction (THRI)*. 2021. Vol. 11. N1. 1-42. DOI: 10.1145/3477391.
5. Gul F., Mir I., Abualigah L. et al. Cooperative multi-function approach: A new strategy for autonomous ground robotics. *Future Generation Computer Systems*. 2022. Vol. 134. 361-373. DOI: 10.1016/j.future.2022.04.007.
6. Khan A.T., Li S., Cao X. Human guided cooperative robotic

- agents in smart home using beetle antennae search. *Science China Information Sciences*. 2022. Vol. 65. N2. 122204. DOI: 10.1007/s11432-020-3073-5.
7. Berger G.S., Teixeira M., Cantieri A. et al. Cooperative heterogeneous robots for autonomous insect trap monitoring system in a precision agriculture scenario. *Agriculture*. 2023. Vol. 13. N2. 239. DOI: 10.3390/agriculture13020239.
 8. Bahani A., Ech-Chhibat E.C., Samri H. et al. Intelligent controlling the gripping force of an object by two computer-controlled cooperative robots. *Applied Computer Science*. 2023. Vol. 19. N1. 133-151. DOI: 10.35784/acs-2023-09.
 9. An X., Wu C., Lin Y. et al. Multi-robot systems and cooperative object transport: Communications, platforms, and challenges. *IEEE Open Journal of the Computer Society*. 2023. Vol. 4. 23-36. DOI: 10.1109/OJCS.2023.3238324.
 10. Enthrakandi Narasimhan G., Bettyjane J. Implementation and study of a novel approach to control adaptive cooperative robot using fuzzy rules. *International Journal of Information Technology*. 2021. Vol. 13. N6. 2287-2294. DOI: 10.1007/s41870-020-00459-z.
 11. Ronzoni M., Accorsi R., Botti L., Manzini R. A support-design framework for cooperative robot systems in labor-intensive manufacturing processes. *Journal of Manufacturing Systems*. 2021. Vol. 61. 646-657. DOI: 10.1016/j.jmsy.2021.10.008.
 12. Bruun E.P.G., Pastrana R., Paris V. et al. Three cooperative robotic fabrication methods for the scaffold-free construction of a masonry arch. *Automation in Construction*. 2021. Vol. 129. 103803. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103803.
 13. Khan A.T., Li S., Cao X. Control framework for cooperative robots in smart home using bio-inspired neural network. *Measurement*. 2021. Vol. 167. 108253. DOI: 10.1016/j.measurement.2020.108253.
 14. Lins R.G., Givigi S.N. Cooperative robotics and machine learning for smart manufacturing: Platform design and trends within the context of industrial internet of things. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. 95444-95455. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3094374.
 15. Testa A., Camisa A., Notarstefano G. ChoiRbot: A ROS 2 toolbox for cooperative robotics. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2021. Vol. 6. N2. 2714-2720. DOI: 10.1109/LRA.2021.3061366.
 16. Gil S., Oakes B., Gomes C. et al. Toward a systematic reporting framework for digital twins: a cooperative robotics case study. *Simulation*. 2025. Vol. 101. N3. 313-339. DOI: 10.1177/00375497241261406.
 17. Lytridis C., Kaburlasos V., Pachidis T.P. et al. An overview of cooperative robotics in agriculture. *Agronomy*. 2021. Vol. 11. N9. 1818. DOI: 10.3390/agronomy11091818.
 18. Дорохов А.С., Павкин Д.Ю., Юрочка С.С. Технология цифровых двойников в сельском хозяйстве: перспективы применения // *Агроинженерия*. 2023. Т. 25. N4. С. 14-25. DOI: 10.26897/2687-1149-2023-4-14-25.
 19. Solovchenko A., Shurygin B., Kuzin A. et al. Linking tissue damage to hyperspectral reflectance for non-invasive monitoring of apple fruit in orchards. *Plants*. 2021. Vol. 10. N2. 1-15. DOI: 10.3390/plants10020310.
 20. Шереужев М.А., Девяткин Ф.В., Арабаджиев Д.И. Моделирование группового управления сельскохозяйственными роботами с использованием конечных автоматов и онтологий // *Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН*. 2023. N6(116).С. 247-263. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-247-263.
 21. Шереужев М.А., Кишев А.Ю. Вопросы выбора системы технического зрения сельскохозяйственных робототехнических комплексов для контроля сорной растительности. *Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН*. 2022. N4 (108).С. 84-95. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-4-108-84-95.
 22. Amorim A., Guimares D., Mendonca T. et al. Robust human position estimation in cooperative robotic cells. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2021. Vol. 67. 102035. DOI: 10.1016/j.rcim.2020.102035.

REFERENCES

1. Wu H., Shang H. Potential game for dynamic task allocation in multi-agent system. *ISA Transactions*. 2020. Vol. 102. 208-220 (In English). DOI: 10.1016/j.isatra.2020.03.004.
2. Shereuzhev M.A., Pak L.A., Karasev P.D., Vinokurov A.O. Formalizing of the workspace and the ontology of the technological process for the performance of technological work by a collaborative robotic cell. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the RAS*. 2022. N6 (110). 1340-143 (In Russian). DOI: 10.35330/1991-6639-2022-6-110-134-143.
3. Benos L., Moysiadis V., Kateris D. et al. Human-robot interaction in agriculture: a systematic review. *Sensors*. 2023. Vol. 23. N15. 6776 (In English). DOI: 10.3390/s23156776.
4. Liu R., Natarajan M., Gombolay M.C. Coordinating human-robot teams with dynamic and stochastic task proficiencies. *ACM Transactions on Human-Robot Interaction*. 2021. Vol. 11. N1. 1-42 (In English). DOI: 10.1145/3477391.
5. Gul F., Mir I., Abualigah L. et al. Cooperative multi-function approach: A new strategy for autonomous ground robotics. *Future Generation Computer Systems*. 2022. Vol. 134. 361-373 (In English). DOI: 10.1016/j.future.2022.04.007.
6. Khan A.T., Li S., Cao X. Human guided cooperative robotic agents in smart home using beetle antennae search. *Science China Information Sciences*. 2022. Vol. 65. N2. 122204 (In English). DOI: 10.1007/s11432-020-3073-5.
7. Berger G.S., Teixeira M., Cantieri A. et al. Cooperative heterogeneous robots for autonomous insect trap monitoring system in a precision agriculture scenario. *Agriculture*. 2023. Vol. 13. N2. 239 (In English). DOI: 10.3390/agriculture13020239.

8. Bahani A., Ech-Chhibat E.C., Samri H. et al. Intelligent controlling the gripping force of an object by two computer-controlled cooperative robots. *Applied Computer Science*. 2023. Vol. 19. N1. 133-151 (In English). DOI: 10.35784/acs-2023-09.
9. An X., Wu C., Lin Y. et al. Multi-robot systems and cooperative object transport: Communications, platforms, and challenges. *IEEE Open Journal of the Computer Society*. 2023. Vol. 4. 23-36 (In English). DOI: 10.1109/OJCS.2023.3238324.
10. Enthrakandi Narasimhan G., Bettyjane J. Implementation and study of a novel approach to control adaptive cooperative robot using fuzzy rules. *International Journal of Information Technology*. 2021. Vol. 13. N6. 2287-2294 (In English). DOI: 10.1007/s41870-020-00459-z.
11. Ronzoni M., Accorsi R., Botti L., Manzini R. A support-design framework for cooperative robot systems in labor-intensive manufacturing processes. *Journal of Manufacturing Systems*. 2021. Vol. 61. 646-657 (In English). DOI: 10.1016/j.jmsy.2021.10.008.
12. Bruun E.P.G., Pastrana R., Paris V. et al. Three cooperative robotic fabrication methods for the scaffold-free construction of a masonry arch. *Automation in Construction*. 2021. Vol. 129. 103803 (In English). DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103803.
13. Khan A.T., Li S., Cao X. Control framework for cooperative robots in smart home using bio-inspired neural network. *Measurement*. 2021. Vol. 167. 108253 (In English). DOI: 10.1016/j.measurement.2020.108253.
14. Lins R.G., Givigi S.N. Cooperative robotics and machine learning for smart manufacturing: Platform design and trends within the context of industrial internet of things. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. 95444-95455 (In English). DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3094374.
15. Testa A., Camisa A., Notarstefano G. ChoiRbot: A ROS 2 toolbox for cooperative robotics. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2021. Vol. 6. N2. 2714-2720 (In English). DOI: 10.1109/LRA.2021.3061366.
16. Gil S., Oakes B., Gomes C. et al. Toward a systematic reporting framework for digital twins: a cooperative robotics case study. *Simulation*. 2025. Vol. 101. N3. 313-339 (In English). DOI: 10.1177/00375497241261406.
17. Lytridis C., Kaburlasos V., Pachidis T.P. et al. An overview of cooperative robotics in agriculture. *Agronomy*. 2021. Vol. 11. N9. 1818 (In English). DOI: 10.3390/agronomy11091818.
18. Dorokhov A.S., Pavkin D.Yu., Yurochka S.S. Digital twin technology in agriculture: prospects for use. *Agricultural Engineering*. 2023. Vol. 25. N4. 14-25 (In Russian). DOI: 10.26897/2687-1149-2023-4-14-25.
19. Solovchenko A., Shurygin B., Kuzin A. et al. Linking tissue damage to hyperspectral reflectance for non-invasive monitoring of apple fruit in orchards. *Plants*. 2021. Vol. 10. N2. 1-15 (In English). DOI: 10.3390/plants10020310.
20. Shereuzhev M. A., Devyatkin F. V., Arabadzhiev D.I. Simulation of group management of agricultural robots using finite state machines and ontologies. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the RAS*. 2023. N6 (116). 247-263 (In Russian). DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-247-263.
21. Shereuzhev M.A., Kisev A.Yu. Questions of choosing a vision system of agricultural robotic systems for weed control. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the RAS*. 2022. N4 (108). 84-95 (In Russian). DOI: 10.35330/1991-6639-2022-4-108-84-95.
22. Amorim A., Guimares D., Mendonca T. et al. Robust human position estimation in cooperative robotic cells. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2021. Vol. 67. 102035 (In English). DOI: 10.1016/j.rcim.2020.102035.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Шереужев М.А. – разработка математической модели;
 Дышеков А.И. – разработка архитектуры системы управления;
 Девяткин Ф.В. – проведение эксперимента.
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Shereuzhev M.A. – development of the mathematical model;
 Dyshekov A.I. – development of the control system architecture;
 Devyatkin F.V. – conducting the experiment.
The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию
 Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on
 The paper was accepted for publication on

03.09.2025
 25.11.2025

EDN: LZQXUI

DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-4-75-83



Научная статья

УДК 631.9 631/635/636.034



Математический аппарат контроллера с интеграцией этологических маркеров теплового стресса

Илья Владимирович Комков,
аспирант, младший научный сотрудник,
e-mail: ilyakomkov10@yandex.ru;

Игорь Мамедяревич Довлатов,
канд. техн. наук, старший научный сотрудник,
e-mail: dovlatovim@mail.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Тепловой стресс представляет серьезную проблему в молочном животноводстве, приводит к снижению надоев, ухудшению репродуктивных показателей и увеличению заболеваемости скота. В условиях глобального потепления актуальность разработки эффективных систем мониторинга и регулирования микроклимата значительно возрастает. (*Цель исследования*) Разработка математического аппарата и алгоритмов работы контроллера, регулирующего уровень теплового стресса с использованием этологических признаков. (*Материалы и методы*) Проведен систематический анализ этологических реакций крупного рогатого скота (20 дойных коров), в том числе оценка поведенческих маркеров, физиологических параметров и микроклиматических условий. Для оценки теплового стресса использован температурно-влажностный индекс (ТНІ). (*Результаты и обсуждение*) В ходе исследования идентифицированы 10 доминирующих поведенческих маркеров теплового стресса из 16 возможных: повышенное сердцебиение, снижение пищеварительной активности, повышенная избирательность пищи, увеличенное поение, учащенное дыхание, поиск затененных мест, увеличение времени лежания, изменение этиологии и угнетение половой охоты. Разработан математический аппарат, включающий уравнения лучистой энергии, влагообмена, определения относительной влажности и температуры воздуха, концентрации углекислого газа. Также созданы алгоритмы для автоматизированного анализа фото- и видеоматериалов с целью выявления этологических признаков стресса. Данная система контроля обеспечивает точность измерений температурно-влажностного индекса ± 1 и снижение энергопотребления на 25 процентов по сравнению с аналогами. (*Выводы*) Созданная система позволяет оперативно выявлять ранние признаки теплового стресса и минимизировать его негативные последствия для продуктивности и благополучия животных. Интеграция данных о микроклимате и поведенческих реакциях животных обеспечивает комплексный подход к управлению микроклиматом в животноводческих помещениях. Предлагаемые математический аппарат и алгоритмы могут быть интегрированы в существующие системы управления микроклиматом, что повысит экономическую эффективность молочного животноводства в условиях климатических изменений.

Ключевые слова: молочный скот, тепловой стресс, продуктивность, ухудшение здоровья, контроллер, математический аппарат, этологические признаки, алгоритмы работы, температурно-влажностный индекс, климат-контроль.

■ **Для цитирования:** Комков И.В., Довлатов И.М. Математический аппарат контроллера с интеграцией этологических маркеров теплового стресса // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2025. Т. 19. №4. С. 75-83. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-4-75-83. EDN: LZQXUI.

Scientific article

Mathematical Framework for a Heat Stress Control System Integrating Behavioral Markers

Ilya V. Komkov,
Ph.D. student (Eng.), junior researcher,
e-mail: ilyakomkov10@yandex.ru;

Igor M. Dovlatov,
Ph.D.(Eng.), senior researcher,
e-mail: dovlatovim@mail.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. Heat stress presents a significant challenge in livestock farming, leading to decreased productivity, impaired reproductive performance, and increased morbidity. In the context of global warming, the need for effective systems to monitor and regulate the microclimate in animal environments is becoming increasingly important. (*Research purpose*) The aim of this study is to develop a mathematical framework and control algorithms for a system that regulates heat stress levels based on ethological indicators. (*Materials and methods*) A systematic analysis was conducted on the ethological responses of cattle based on observation of 20 dairy cows. The study included the assessment of behavioral markers, physiological parameters, and microclimatic conditions.

Heat stress levels were evaluated using the Temperature-Humidity Index (THI). (*Results and discussion*) The study identified 10 dominant behavioral markers of heat stress out of 16 possible, including elevated heart rate, reduced digestive activity, increased food selectivity, increased water intake, rapid breathing, seeking shaded areas, prolonged lying time, alterations in behavior patterns, and suppression of estrus. A mathematical framework was developed, incorporating equations for radiant energy, moisture exchange, relative humidity, air temperature, and carbon dioxide concentration. Additionally, algorithms were designed for the automated analysis of photo and video data to detect ethological indicators of stress. The proposed control system ensures accurate measurement of the Temperature-Humidity Index (± 1) and achieves a 25 percent reduction in energy consumption compared to existing systems. (*Conclusions*) The developed system enables early detection of heat stress symptoms and contributes to mitigating their negative impact on animal productivity and welfare. By integrating microclimate data with behavioral responses, the system offers a comprehensive approach to climate control in livestock housing. The proposed mathematical framework and control algorithms can be incorporated into existing microclimate control systems, thereby improving the economic efficiency of dairy farming under changing climate conditions.

Keywords: dairy cattle, heat stress, productivity, health deterioration, controller, mathematical framework, ethological indicators, control algorithms, temperature-humidity index, climate control.

■ **For citation:** Komkov I.V., Dovlatov I.M. Mathematical framework for a heat stress control system integrating behavioral markers. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N4. 75-83 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-4-75-83. EDN: LZQXUI.

Воздействие высокой температуры и влажности вызывает тепловой стресс у сельскохозяйственных животных, что приводит к ухудшению их здоровья, снижению продуктивности и росту экономических потерь. Использование современных технических средств позволяет эффективно контролировать температурный режим в помещениях и минимизировать негативное влияние жары. Комплексный подход, основанный на достижениях науки и техники, способен обеспечить устойчивость перед вызовами изменений глобального климата [1, 2]. Это требует адаптации сельскохозяйственных систем путем создания и управления микроклиматом, оптимизации водопользования, а также цифровых технологий, обеспечивающих продовольственную и экологическую стабильность. Данная область остается актуальным направлением в аграрной науке [3, 4].

Для предупреждения и предотвращения теплового стресса проводятся научные исследования по созданию систем микроклимата в помещениях, выведению адаптированных пород крупного рогатого скота. Также рекомендуется разрабатывать и внедрять в рацион специальные кормовые добавки, локальные пастбищные системы, гибридные модели прогнозирования и точного планирования [5].

Состояние теплового стресса у дойных коров вызывает нарушение гормонального баланса, окислительный стресс и апоптоз клеток, ухудшение репродуктивной способности и повышение риска потери эмбрионов. Снижается содержание жира и белка в молоке из-за нарушения липидного синтеза и азотистого обмена. Метаболические изменения выражаются в дефиците глюкозы, повышении уровня мочевины и кетоновых тел, в других отклонениях. Прогнозирование влияния теплового стресса на

дойных коров предполагает применение современных подходов, в том числе моделей машинного обучения, в зависимости от изменения температурно-влажностного индекса (*Temperature-Humidity Index, THI*) [6-8].

В Южной Корее при $THI > 72$ суточный удой снижается на 0,3-1,2 кг, содержание в молоке жира и белка – на 0,1-0,3%, наблюдаются гипертермия ($>39,5^\circ\text{C}$) и тахипноэ (>80 вдохов/мин). В Казахстане из-за зимнего отклонения температуры ($-1,7^\circ\text{C}$) и влажности ($+9,6\%$) заболеваемость животных повышается до 63,8%, летом – до 37-47%. Экономические потери в обоих регионах достигают 5% вырочки.

Согласно данным с боюсов активность животных увеличивалась с ростом относительной влажности воздуха (RH) до 45%, стабилизировалась в диапазоне 45-65% и резко возрастала при более высокой влажности, тогда как потребление воды снижалось [9-11].

В других исследованиях выявлены различия в реакции голштинских и джерсейских коров на тепловой стресс (THI 74,86 и 62,92). При THI 74,86 увеличилась частота дыхания и снизился удой у обеих пород, но у джерсейских отмечены лучшие показатели терморегуляции и качество молока. У коров тайско-голштинской популяции благодаря скрещиванию с местными породами порог стресса выше (THI 76). В регионе Латинской Америки, где в среднем 312 дней $THI \geq 68$, летом круглосуточно и зимой течение 8-12 ч, коровы находятся в стрессе более 75% времени. При $THI \geq 72$ удой падает на 6,7-11,8% [12, 13].

Летом из-за теплового стресса у дойных коров снижается лежание на 15% и увеличивается стояние на 20%. Циркадная ритмика проявляется в

утренне-вечерней активности кормления и ночном лежании. Ограниченное пространство усиливает конкуренцию за кормушки, что коррелирует с ухудшением метаболизма и продуктивности. Исследования, проведенные в Краснодарском крае, показали, что при $T_{HI} > 72$ снижаются удои на 10-25%, содержание жира и белка на 0,1-0,3%. Отмечаются гематологические изменения (повышение температуры тела, частоты дыхания, уровня кортизола, времени стояния), увеличивающие риск мастита и кетоза [14, 15].

У животных повышаются температура глаз (*IRT-Eye*), частота дыхания (80-100 вдохов/мин), уровень кортизола (30-40%), потребление воды (50%). 70% животных перемещаются в тень, снижается кормовая активность (15-20%) [16, 17].

Увеличивается время стояния (18-23%), снижаются лежание (18-22%) и руминация (30%), животные чаще посещают поилки (40-45%). Физиологические изменения проявляются в повышении температуры тела (до 39,8 °C), дыхания (72 вдохов/мин), кортизола (42%) и лактата (28%), снижении pH крови (7,31). Эти поведенческие и физиологические показатели служат ранними индикаторами стресса, за 2-3 ч до его клинических проявлений [18, 19].

С целью снижения теплового стресса у коров предлагается система обеспечения температурных режимов, устойчивая к агрессивному влиянию внешней среды, герметичная и малошумная (не более 65-70 дБ). Устанавливается оборудование точечного обдува воздухом над животными или в зоне отдыха с возможностью увлажнения мелкодисперсной жидкостью или дезинфекции помещений в присутствии животных. Разработанные алгоритмы позволяют минимизировать термический стресс и поддерживать комфортные условия для скота [20].

Разработана система регулирования уровня теплового стресса КРС с использованием прецизионной вентиляции и адаптивного увлажнения воздуха. С помощью датчиков T_{HI} обеспечивается контроль с точностью ± 1 ед., снижается энергопотребление на 25%, капитальные затраты на 24% по сравнению с использованием вентиляционного рукава ГСВ-100, эксплуатационные расходы сокращаются на 18% [21, 22].

Путем моделирования воздушных потоков выявлена вертикальная стратификация температуры в помещениях. Коньковые зазоры способствуют оттоку теплого воздуха, но их эффективность ограничена. В проектировании систем вентиляции применяется CFD-моделирование для точного прогнозирования теплового стресса с учетом физиологических параметров животных и климатических факторов [23].

Цель исследования: разработка математического аппарата и алгоритмов работы контроллера, ре-

гулирующего уровень теплового стресса коров с использованием этологических признаков.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Аналитическая информация формировалась из открытых источников данных *elibrary*, *MDPI*, *Google Scholar*. Хозяйственный эксперимент проводился в 2023 г. на базе ФГБУ «Опытная Станция «Григорьевское» (Ярославская область). Для опыта были отобраны 20 лактирующих коров голштинской породы ($n = 20$) в типовом коровнике привязного содержания с естественной вентиляцией при температурном режиме 15-25 °C. Животные были распределены в группы по принципу пар-аналогов с учетом живой массы (650 ± 15 кг), стадии лактации (120 ± 10 дней) и исходного удоя ($12 \pm 0,8$ кг/сут).

Тепловой стресс моделировался в течение 48-часового периода с поддержанием температурно-влажностного индекса $T_{HI} \geq 77$. Параметры микроклимата контролировали с помощью датчиков *Hobo U12-012*, обеспечивающих непрерывный мониторинг температуры и относительной влажности воздуха. Изменения в этологии животных фиксировались на основании визуальной оценки поведенческих реакций, стандартизованных протоколов наблюдения, анализа индивидуальной и групповой активности. Молочную продуктивность устанавливали по контрольному доению до наступления теплового стресса 13 июля (15 °C) и на вторые сутки после его наступления 9 августа (тепловой стресс наблюдался 7 августа при 29 °C). Молоко коров собирали в пластиковые контейнеры без добавления консерванта, анализировали в нем содержание жира, белка и количество соматических клеток на приборах «Лактан 1-4М Профи», «СОМАТОС-Мини».

Исследование проведено с соблюдением этических норм и обеспечением здоровья крупного рогатого скота. Животные наблюдались в естественных условиях проживания с тем оснащением, которое на момент эксперимента было на ферме. Данные о молочной продуктивности и качестве молока представлены в *таблице 1*.

До наступления теплового стресса среднесуточный удой коров составлял 12,0 кг. После воздействия теплового стресса ($T_{HI} \geq 77$) наблюдалось снижение продуктивности на 13,5%, что согласуется с установленным влиянием термического стресса на физиологические показатели животных. Зафиксировано ухудшение показателей качества молока. Содержание молочного жира и белка снизилось на 0,28 и 0,20% соответственно, что может быть связано с нарушением метаболических процессов в организме коров. Увеличение на 27,0% количества соматических клеток указывает на возможное развитие стресс-индуцированных физиологических дисфункций, требующих дальнейшего изучения в контексте зооигиенических норм.

СРЕДНИЕ ПОКАЗАТЕЛИ МОЛОЧНОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ И КАЧЕСТВА МОЛОКА (N = 20) AVERAGE MILK YIELD AND MILK QUALITY INDICATORS (N = 20)		
Показатель	M±m	δ
<i>До начала теплового стресса</i>		
Суточный удой, кг	12,0±0,76	2,42
Массовая доля жира, %	3,70±0,04	0,14
Массовая доля белка, %	3,39±0,01	0,05
Количество соматических клеток, тыс/см ³	248,10±7,61	24,07
<i>После воздействия теплового стресса</i>		
Суточный удой, кг	10,38±0,66	2,09
Массовая доля жира, %	3,42±0,04	0,13
Массовая доля белка, %	3,18±0,01	0,04
Количество соматических клеток, тыс/см ³	315,09±9,67	30,56

Для идентификации теплового стресса используется разработанная ранее формула [24]:

$$THI = 0,8 \cdot T + K \cdot RH (T - 14,4), \quad (1)$$

где *T* – температура окружающей среды, °C; *RH* – относительная влажность воздуха в помещении, *RH* = 0,50%; *K* – поправочный коэффициент, учитывающий влияния влажности кормов, *K* = 0,95-1,05 в зависимости от вида корма (0,95 – молотое зерно; 1,00 – гранулированные комбикорма; 1,05 – сочные корма с высоким содержанием влажности).

Для обработки полученных данных использовали пакет программ *Microsoft Office*, в частности *Microsoft Excel* (США). Функционально-структурные схемы разработаны с помощью онлайн-приложения для создания диаграмм и схем *Draw.io*.

По таблице теплового стресса (рис. 1) [24] определяли начало его воздействия.

φ °C	17,5	20	22,5	25	27,5	30	32,5	35
50%	0,82	0,93	1,02	1,17	1,33	1,49	1,63	1,79
55%	0,83	1	1,16	1,25	1,39	1,56	1,72	1,83
60%	0,86	1,04	1,18	1,31	1,46	1,6	1,76	1,88
65%	0,88	1,09	1,21	1,39	1,56	1,82	1,86	1,98
70%	0,92	1,12	1,26	1,46	1,69	1,97	2,01	2,09
75%	0,96	1,12	1,28	1,61	1,92	2,06	2,18	2,28
80%	1	1,18	1,34	1,68	1,98	2,25	2,33	2,46

Рис. 1. Зависимость индекса теплового стресса от температуры и относительной влажности воздуха

Fig. 1. Dependence of the heat stress index on air temperature and relative humidity

Результаты и обсуждение. На основании наблюдений у 100% обследованных коров отмечено развитие тахипноэ, активный поиск затененных зон, усиление водопотребления и выраженные изменения в этологическом поведении (табл. 2).

Выявлены признаки общей вялости (75% животных), тахикардии (70%), снижение секреторной активности желудочно-кишечного тракта (50%). Наблюдались угнетение охоты и повышен-

ЭТОЛОГИЧЕСКОЕ НАБЛЮДЕНИЕ ЗА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ЖИВОТНЫМИ (N = 20) ETHOLOGICAL MONITORING OF EXPERIMENTAL CATTLE (N = 20)		
Этологический признак	Количество коров с выявленным признаком	% от общего количества
Повышение частоты сердечных сокращений	14	70
Снижение пищеварительной активности	10	50
Учащение дыхания	20	100
Поиск затененных мест	20	100
Снижение качества рогового слоя	8	35
Изменение этиологии	20	100
Увеличение времени лежания	10	50
Угнетение половой охоты	12	60
Повышение потливости (гипергидроз)	12	60
Возникновение хромоты	10	50
Отслоение роговой пластины	7	35
Повышение избирательности пищи	10	50
Повышенное поение	20	100
Повышение агрессивности	4	20
Повышение общей тревожности	11	55
Общая вялость	15	75

ная потливость (60%), агрессивное поведение (20%), усиление общей тревожности (55%), Зафиксированы повышение избирательности пищи, увеличение времени лежания, развитие клинически выраженной хромоты. У 40% животных хромота была непосредственно связана с влиянием теплового стресса. Выявлено отслоение роговой пластины у 35% коров.

По сопоставлению научных данных и результатов эксперимента разработана интегративная функционально-структурная схема, описывающая механизмы адаптации организма КРС к тепловому стрессу (рис. 2). Такая модель может служить основой для оптимизации стратегий управления микроклиматом и кормлением в условиях климатических изменений.

Возникновение теплового стресса у крупного рогатого скота обусловлено взаимодействием факторов, которые совместно выступают причинными элементами его развития.

На основе интегративной модели адаптации к тепловому стрессу предложено создать структурированную базу данных для автоматизированной оценки поведенческого профиля животных.



Рис. 2. Функциональная схема патофизиологических реакций на тепловой стресс

Fig. 2. Functional diagram of pathophysiological reactions to heat stress

Технологии видеонаблюдения и алгоритмы машинного обучения позволят выявлять ранние признаки стресса и оптимизировать параметры содержания скота в условиях климатических изменений. Данный подход объединяет физиологические показатели (изменения руминации, активности, микроклимата) с поведенческими индикаторами, обеспечивая комплексный анализ адаптационных реакций.

Для обеспечения высокоточного функционирования системы управления микроклиматом разработан математический аппарат, представляющий собой комплексную модель, включающую уравнения определения лучистой энергии (Q_l), количество тепла, которое необходимо отвести или добавить в помещение (Q_b), расчета влагообмена (W_b), относительной влажности (W) и температуры (t) воздуха, концентрации углекислого газа (CCO_2), а также индекса температуры и влажности (THI), служащего критически важным показателем для объективной оценки условий теплового стресса и физиологических реакций животных.

$$Q_l = C_{пр} F_u \left[\left(\frac{T_{ж}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{огр}}{100} \right)^4 \right] \phi_{ж-огр}, \quad (2)$$

где Q_l – лучистая энергия, кДж; $C_{пр}$ – приведенный коэффициент излучения; F_u – площадь излучаемой поверхности, м²; $T_{ж}$ – абсолютная температура излучающей поверхности, К; $T_{огр}$ – абсолютная температура поверхности ограждения, К; $\phi_{ж-огр}$ – коэффициент облученности в системе животные – ограждения.

$$\begin{aligned} \pm Q_b = & Q_{ж} + Q_{пж} + Q_{ср} + Q + Q_{корм} + \\ & + Q_{ж\ корм} - Q_{исп\ к} - Q_{исп\ пж}, \end{aligned} \quad (3)$$

где Q_b – количество тепла, которое необходимо отводить или добавлять в помещение, Вт; $Q_{ж}$ – тепло, поступающее от животных, Вт; $Q_{пж}$ – теплопоступления от продуктов жизнедеятельности, Вт; $Q_{ср}$ – среднечасовое потребление тепловой энергии, Вт;

Q – годовое потребление тепловой энергии, Вт; $Q_{корм}$ – тепловыделение от кормов, Вт; $Q_{ж\ корм}$ – выделение тепла от переваривания корма, Вт; $Q_{исп\ к}$ – тепло, расходуемое на испарение влаги из кормов, Вт; $Q_{исп\ пж}$ – тепло, расходуемое на испарение влаги из продуктов жизнедеятельности, Вт.

$$W_b = W_{вп} + W_{дж} + W_{корм} + W_{п} + W_{от\ ж}, \quad (4)$$

где W_b – количество влаги, которое необходимо удалить из помещения, кг/ч; $W_{дж}$ – количество влаги, поступающей в результате дыхания животных, кг/ч; $W_{вп}$ – количество влаги внутри помещения на поверхности ограждений, кг/ч; $W_{корм}$ – количество влаги, поступающей с кормом, кг/ч; $W_{п}$ – количество влаги, поступающей с приточным воздухом, кг/ч; $W_{от\ ж}$ – количество влаги, поступающей от отходов жизнедеятельности, кг/ч.

$$W = \frac{p}{p_0} \cdot 100\%, \quad (5)$$

где W – относительная влажность воздуха, %; p – абсолютная влажность воздуха, кг/м³; p_0 – плотность насыщенного водяного пара при текущей температуре, кг/м³.

$$t = \frac{t_p - t_r}{2}, \quad (6)$$

где t – температура в помещении, °С; t_p – температура воздуха в помещении, °С; t_r – температура внутренней поверхностей пола, стен, оборудования, °С.

$$CCO_2 = 0,03 \cdot V_a / V_{п}, \quad (7)$$

где 0,03 – содержание углекислого газа в атмосферном воздухе, %; V_a – объем атмосферного воздуха, прошедшего через поглотитель, м³; $V_{п}$ – объем воздуха внутри помещения, прошедшего через поглотитель, м³.

Эффективное регулирование температуры, влажности и скорости воздушного потока в животноводческих помещениях достигается за счет применения технических устройств:

- осевых и потолочных вентиляторов. Они обеспечивают принудительную вентиляцию, повышают обмен воздуха и способствуют отводу избыточного тепла от тела животных. Работа вентиляторов позволяет снизить температуру в зоне содержания скота на 2-5 °С, что критично для предотвращения тахипноэ и гипертермии;

- гибких штор для регулирования притока наружного воздуха и защиты животных от прямого солнечного излучения. Адаптация положения животных в зависимости от времени суток и погодных условий позволяет оптимизировать температурно-влажностный режим в помещениях;

- гибких воздуховодов, которые направляют потоки охлажденного воздуха непосредственно к зонам

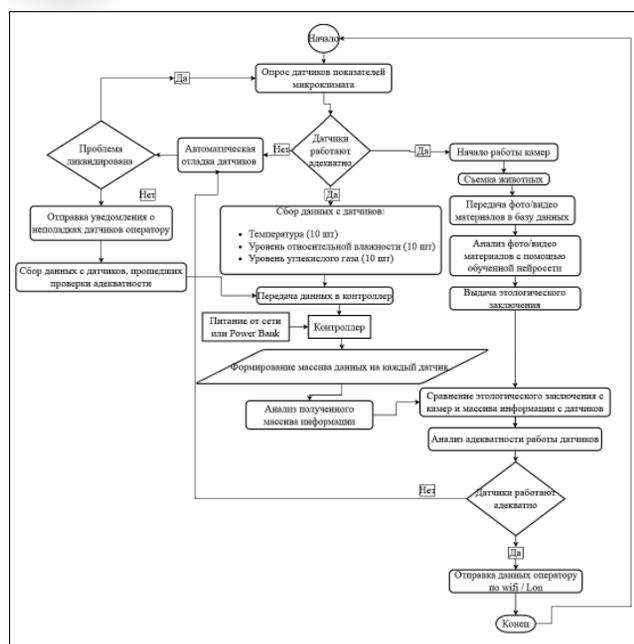


Рис. 3. Алгоритм работы контроллера
Fig. 3. Controller operation algorithm

содержания скота, обеспечивая локальное снижение температуры и улучшая терморегуляцию у коров.

Все эти механизмы подчиняются централизованному контроллеру, который анализирует данные с датчиков температуры, влажности и скорости воздуха, а также значения индекса температуры и влажности. На основе этих параметров автоматически регулируются мощность вентиляторов, положение штор и направление воздушных потоков, обеспечивая стабильные микроклиматические условия в оптимальном диапазоне (5-25 °С).

Использование исполнительных механизмов в сочетании с автоматизированным контролем микроклимата представляет собой перспективную стратегию снижения негативного влияния теплового стресса. Это направление требует дальнейших исследований с целью оптимизации энергоэффективности и масштабирования на малые хозяйства.

Необходимо использовать современные технологии, например контроллер, для идентификации и регулирования теплового стресса. На данном этапе исследований предполагаются идентификация теплового стресса и уведомление оператора о его наступлении (рис. 3). В последующем функционал дополнится, и будут передаваться указания исполнительным механизмам для регулирования микроклиматических параметров в помещении.

В соответствии с алгоритмом работы контроллера вначале запускается опрос датчиков показателей микроклимата. Если датчики работают адекватно, то с них осуществляется сбор данных. При отрицательном ответе происходят автоматическая отладка датчиков, их повторный опрос, оператору

отправляется уведомление о неполадках. Данные с прошедших проверку датчиков собираются и передаются в контроллер. По каждому датчику формируется массив данных и проводится анализ.

Для определения этологического состояния животных при положительной проверке адекватности начинают работать фото/видеокамеры (рис. 4). Фото/видеоматериал отправляется в базу данных, осуществляется его анализ с целью выявления этологических признаков теплового стресса и на основе этого формируется этологическое заключение. Проводится сравнение этологического заключения с камер и массива информации с датчиков, затем дополнительно осуществляется анализ адекватности работы датчиков. При подтверждении их адекватности данные о наступлении теплового стресса отправляются оператору и на персональный компьютер. В случае отрицательного ответа происходит возврат к автоматической отладке датчиков и далее.



Рис. 4. Алгоритм оценки этологических признаков
Fig. 4. Algorithm for assessing ethological markers

Анализ полученного материала заключается в определении наличия этологических признаков у животных: повышенная ЧСС; сниженная пищеварительная активность; повышенная избирательность корма; повышенное поение; учащенное дыхание; поиск затененных мест; увеличение времени лежания; изменение этологии; угнетение половой охоты; повышенная потливость; возникновение хромоты; повышенная общая тревожность; общая вялость. При обнаружении хотя бы 9-10 из 13 этологических признаков выдается заключение о наличии теплового стресса.

При отрицательном ответе выдается этологическое заключение о потенциальном наступлении у животных теплового стресса. После этого проводится сравнение этологического заключения с камер и массива информации с датчиков.

Выводы. Разработанный математический аппарат, включающий уравнения радиационного теплового баланса, влагообмена и температурно-влажностного индекса, обеспечивает высокоточное управление микроклиматом в условиях теплового стресса.

Идентификация 10 ключевых этологических

маркеров из 16 возможных и патофизиологических реакций позволяет оперативно выявлять и минимизировать негативные последствия влияния от теплового воздействия на продуктивность скота.

Разработанные алгоритмы обеспечивают оптимальное функционирование системы управления и комплексную оценку поведенческих маркеров.

Предложена комплексная функциональная схема, отражающая мультисистемные патофизиологические реакции организма животных на тепловое воздействие.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чаплыгин М.Е., Ценч Ю.С., Подзоров А.В. Развитие конструкций сеялок и технологий посева семян в ленте // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2025. Т. 19. N1. С. 103-110. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-1-103-110.
2. Ахалая Б.Х., Ценч Ю.С., Беляева Н.И. Автоматизированная почвообрабатывающая машина для послонной обработки почвы высокотурбулентной воздушной струей // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2025. Т. 19. N2. С. 78-83. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-2-78-83.
3. Киприянов Ф.А., Алешкин А.В., Савиных П.А. Экспериментально-математическое моделирование процесса удаления поверхностной влаги с семян после увлажнения // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2025. Т. 19. N1. С. 4-12. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-1-4-12.
4. Каличкин В.К., Максимович К.Ю., Алещенко О.А., Алещенко В.В. Прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур: структура данных и методы искусственного интеллекта // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2025. Т. 19. N2. С. 33-44. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-2-33-44.
5. Muzzo B.I., Ramsey R.D., Villalba J.J. Changes in climate and their implications for cattle nutrition and management. *Climate*. 2025. N13 (1). DOI: 10.3390/cli13010001.
6. Capela L., Leites I., Pereira R.M.L.N. Heat stress from calving to mating: mechanisms and impact on cattle fertility. *Animals*. 2025. N15. 1747. DOI: 10.3390/ani15121747.
7. Antanaitis R., Džermeikaitė K., Krištolaitytė J. et al. Impact of heat stress on the in-line registered milk fat-to-protein ratio and metabolic profile in dairy cows. *Agriculture*. 2024. N14. 203. DOI: 10.3390/agriculture14020203.
8. Giannone C., Bovo M., Ceccarelli M. et al. Review of the heat stress-induced responses in dairy cattle. *Animals*. 2023. N13. 3451. DOI: 10.3390/ani13223451.
9. Assatbayeva G., Issabekova S., Uskenov R. et al. Influence of microclimate on ketosis, mastitis and diseases of cow reproductive organs. *Journal of Animal Behaviour and Biometeorology*. 2022. N10(3). 2230. DOI: 10.31893/jabb.22030.
10. Jeon E., Jang S., Yeo J.-M. et al. Impact of climate change and heat stress on milk production in korean holstein cows: a large-scale data analysis. *Animals*. 2023. N13. 2946. DOI: 10.3390/ani13182946.
11. Barto A.O., Bailey D.W., Trieu L.L. et al. monitoring behavior and welfare of cattle in response to summer weather in an arizona rangeland pasture using a commercial rumen bolus. *Animals*. 2025. N15. 1448. DOI: 10.3390/ani15101448.
12. Wang Z., Guo M., Liang Y. et al. Breed-specific responses and ruminal microbiome shifts in dairy cows under heat stress. *Animals*. 2025. N15. 817. DOI: 10.3390/ani15060817.
13. Rodriguez-Venegas R., Meza-Herrera C.A., Robles-Trillo P.A. et al. Heat stress characterization in a dairy cattle intensive production cluster under arid land conditions: an annual, seasonal, daily, and minute-to-minute, big data approach. *Agriculture*. 2022. N12. 760. DOI: 10.3390/agriculture12060760.
14. Кузьминова Е.В., Семененко М.П., Абрамов А.А. и др. Проблема теплового стресса в молочном животноводстве // *Ветеринария Кубани*. 2020. N3. С. 10-11. DOI: 10.33861/2071-8020-2020-3-10-11.
15. Leliveld L.M.C., Riva E., Mattachini G., Finzi A. et al. Dairy cow behavior is affected by period, time of day and housing. *Animals*. 2022. N12. 512. DOI: 10.3390/ani12040512.
16. Idris M., Sullivan M., Gaughan J.B., Phillips C.J.C. The relationship between the infrared eye temperature of beef cattle and associated biological responses at high environmental temperatures. *Animals*. 2024. N14. 2898. DOI: 10.3390/ani14192898.
17. Idris M., Sullivan M., Gaughan J.B., Phillips C.J.C. Behavioural responses of beef cattle to hot conditions. *Animals*. 2024. N14. 2444. DOI: 10.3390/ani14162444.
18. Antanaitis R., Džermeikaitė K., Krištolaitytė J. et al. Short-term effects of heat stress on cow behavior, registered by innovative technologies and blood gas parameters. *Animals*. 2024. N14. 2390. DOI: 10.3390/ani14162390.
19. Antanaitis R., Džermeikaitė K., Bepalovaitė A. et al. Assessment of ruminating, eating, and locomotion behavior during heat stress in dairy cattle by using advanced technological monitoring. *Animals*. 2023. N13. 2825. DOI: 10.3390/ani13182825.
20. Комков И.В., Довлатов И.М., Павкин Д.Ю., Матве-

- ев В.Ю. Разработка алгоритмов управления системы обеспечения температурных режимов для уменьшения стресса животных // *Вестник НГИЭИ*. 2024. N5 (156). С. 7-18. DOI: 10.24412/2227-9407-2024-5-7-18.
21. Довлатов И.М., Комков И.В., Матвеев В.Ю. Повышение рентабельности молочных ферм через адаптацию к глобальному потеплению: анализ NPV автоматизированных систем и стратегии для Южного федерального округа // *Вестник НГИЭИ*. 2025. N6(169). С. 82-91. DOI: 10.24412/2227-9407-2025-6-82-91.
22. Комков И.В., Довлатов И.М., Юрочка С.С. и др. Обоснование современной системы обеспечения температурных режимов для уменьшения стресса животных // *Аграрный научный журнал*. 2024. N11. С. 142-149. DOI: 10.28983/asj.y2024i11pp142-149.
23. Colombari D., Masoero F., Della Torre A. A CFD Methodology for the modelling of animal thermal welfare in hybrid ventilated livestock buildings. *AgriEngineering*. 2024. N6. 1525-1548. DOI: 0.3390/agriengineering6020087.
24. Довлатов И.М., Комков И.В., Базаев С.О. Влияние теплового стресса, определение температурно-влажностного индекса // *Аграрная наука*. 2024. N10. С. 171-176. DOI: 10.32634/0869-8155-2024-387-10-171-176.

REFERENCES

1. Chaplygin M.E., Tsench Yu.S., Podzorov A.V. Development of seeder designs and technologies of seed tape planting. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N1. 103-110 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-1-103-110.
2. Akhalaya B.Kh., Tsench Yu.S., Belyaeva N.I. Automated layer-by-layer soil tillage machine using a highly turbulent air jet. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N2. 78-83 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-2-78-83.
3. Kipriyanov F.A., Aleshkin A.V., Savinykh P.A. Experimental-mathematical modeling of surface moisture removal from pre-moistened seeds. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N1. 4-12 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-1-4-12.
4. Kalichkin V.K., Maksimovich K.Yu., Aleshchenko O.A., Aleshchenko V.V. Crop yield prediction: data structure and ai-powered methods. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N2. 33-44 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-2-33-44.
5. Muzzo B.I., Ramsey R.D., Villalba J.J. Changes in climate and their implications for cattle nutrition and management. *Climate*. 2025. N13(1) (In English). DOI: 10.3390/cli13010001.
6. Capela L., Leites I., Pereira R.M.L.N. Heat stress from calving to mating: mechanisms and impact on cattle fertility. *Animals*. 2025. N15. 1747 (In English). DOI: 10.3390/ani15121747.
7. Antanaitis R., Džermeikaitė K., Krištolaitytė J. et al. Impact of heat stress on the in-line registered milk fat-to-protein ratio and metabolic profile in dairy cows. *Agriculture*. 2024. N14. 203 (In English). DOI: 10.3390/agriculture14020203.
8. Giannone C., Bovo M., Ceccarelli M. et al P. Review of the heat stress-induced responses in dairy cattle. *Animals*. 2023. N13. 3451 (In English). DOI: 10.3390/ani13223451.
9. Assatbayeva G., Issabekova S., Uskenov R. et al. Influence of microclimate on ketosis, mastitis and diseases of cow reproductive organs. *Journal of Animal Behaviour and Biometeorology*. 2022. N10 (3). 2230 (In English). DOI: 10.31893/jabb.22030.
10. Jeon E., Jang S., Yeo J.-M. et al. Impact of climate change and heat stress on milk production in korean holstein cows: a large-scale data analysis. *Animals*. 2023. N13. 2946 (In English). DOI: 10.3390/ani13182946.
11. Barto A.O., Bailey D.W., Trieu L.L. et al. Monitoring behavior and welfare of cattle in response to summer weather in an arizona rangeland pasture using a commercial rumen bolus. *Animals*. 2025. N15. 1448 (In English). DOI: 10.3390/ani15101448.
12. Wang Z., Guo M., Liang Y. et al. Breed-specific responses and ruminal microbiome shifts in dairy cows under heat stress. *Animals*. 2025. N15. 817 (In English). DOI: 10.3390/ani15060817.
13. Rodriguez-Venegas R., Meza-Herrera C.A., Robles-Trillo P.A. et al. Heat stress characterization in a dairy cattle intensive production cluster under arid land conditions: an annual, seasonal, daily, and minute-to-minute, big data approach. *Agriculture*. 2022. N12. 760 (In English). DOI: 10.3390/agriculture12060760.
14. Kuzminova E.V., Semenenko M.P., Abramov A.A. et al. Heat stress problem in dairy farming. *Veterinaria Kubani*. 2020. N3. 10-11 (In Russian). DOI: 10.33861/2071-8020-2020-3-10-11.
15. Leliveld L.M.C., Riva E., Mattachini G. et al. Dairy cow behavior is affected by period, time of day and housing. *Animals*. 2022. N12. 512 (In English). DOI: 10.3390/ani12040512.
16. Idris M., Sullivan M., Gaughan J.B., Phillips C.J.C. The relationship between the infrared eye temperature of beef cattle and associated biological responses at high environmental temperatures. *Animals*. 2024. N14. 2898 (In English). DOI: 10.3390/ani14192898.
17. Idris M., Sullivan M., Gaughan J.B., Phillips C.J.C. Behavioural responses of beef cattle to hot conditions. *Animals*. 2024. N14. 2444 (In English). DOI: 10.3390/ani14162444.
18. Antanaitis R., Džermeikaitė K., Krištolaitytė J. et al. Short-term effects of heat stress on cow behavior, registered by innovative technologies and blood gas parameters. *Animals*. 2024. N14. 2390 (In English). DOI: 10.3390/ani14162390.
19. Antanaitis R., Džermeikaitė K., Bepalovaitė A. et al. Assessment of ruminating, eating, and locomotion behavior during heat stress in dairy cattle by using advanced technological monitoring. *Animals*. 2023. N13. 2825 (In



- English). DOI: 10.3390/ani13182825.
20. Komkov I.V., Dovlatov I.M., Pavkin D.Yu., Matveev V.Yu. Development of control algorithms for temperature control systems to reduce animal stress. *Bulletin NGIEI*. 2024. N5 (156). 7-18 (In Russian). DOI: 10.24412/2227-9407-2024-5-7-18.
21. Dovlatov I.M., Komkov I.V., Matveev V.Yu. Improving dairy farm profitability through adaptation to global warming: NPV analysis of automated systems and strategies for the Southern Federal District. *Bulletin NGIEI*. 2025. N6(169). 82-91 (In Russian). DOI: 10.24412/2227-9407-2025-6-82-91.
22. Komkov I.V., Dovlatov I.M., Yurochka S.S. et al. Substan-
- tiation of a modern temperature control system for reducing animal stress. *Agrarian Scientific Journal*. 2024. N11. 142-149 (In Russian). DOI: 10.28983/asj.y2024i11pp142-149.
23. Colombari D., Masoero F., Della Torre A.A. CFD methodology for the modelling of animal thermal welfare in hybrid ventilated livestock buildings. *AgriEngineering*. 2024. N6. 1525-1548 (In English). DOI: 10.3390/agriengineering6020087.
24. Dovlatov I.M., Komkov I.V., Bazaev S.O. et al. Effect of heat stress, determination of temperature-humidity index. *Agrarian Science*. 2024. N10. 171-176 (In Russian). DOI: 10.32634/0869-8155-2024-387-10-171-176.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Комков И.В. – литературный обзор, обработка результатов исследования, формирование текста и визуализация;

Довлатов И.М. – научное руководство, формулирование основных направлений исследования, доработка текста и общих выводов.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Komkov I.V. – literature review, processing of research results, manuscript drafting, and visualization;

Dovlatov I.M. – scientific supervision, formulation of the main research directions, manuscript revision, and development of general conclusions.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию
Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on
The paper was accepted for publication on

04.09.2025
25.11.2025

EDN: QAJHBT
DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-4-84-90



Научная статья
УДК 637.115:637.116-83:631.1716:36.084.23



Технические решения для механизированного производства продуктов животноводства в условиях альпийских пастбищ

Альберт Баширович Барагунов,
доктор технических наук, доцент,
e-mail: baragun_albert@mail.ru;

Залимхан Русланович Кудаяев,
старший преподаватель,
e-mail: zalimhan007@mail.ru

Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В.М. Кокова, г. Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика, Российская Федерация

Реферат. Производство питьевого молока на альпийских пастбищах связано с рядом особенностей и сложностей. Отсутствие адаптированных технических средств для получения и первичной обработки молока может привести к экономическим потерям, даже если район обладает экологически чистыми ресурсами и богатой кормовой базой. (*Цель исследования*) Разработка технических средств и технологии замкнутого цикла производства коровьего питьевого молока в условиях альпийских пастбищ. (*Материалы и методы*) Рассмотрены основные аспекты организации замкнутого цикла производства молока с применением технических средств для получения и первичной обработки молока за счет возобновляемого источника энергии горных ледниковых рек. Данные технические решения обеспечены патентной защитой, опытные образцы успешно апробированы в горных хозяйствах Кабардино-Балкарской Республики. (*Результаты и обсуждение*) Предлагаются технические средства молоковыведения, адаптированные для щадящего воздействия на вымя коров при доении. Парное молоко поступает в охладительную установку с естественным источником холода от ледниковых рек. Начальная степень чистоты молока соответствовала 1-й группе, средняя жирность 3,65 процента, бактериальная обсемененность 280,7 тысяч микроорганизмов на 1 миллилитр. Среднесуточный удой составил 12,5 килограмма при поголовье 100 коров. Выдоенное молоко охлаждается в течение 25 минут и его температура поддерживается до дальнейшей транспортировки или переработки. Предлагаемый подход соответствует эффективным условиям хранения молока в горах. (*Выводы*) Внедрение рассмотренных технических решений существенно повышает рентабельность производства коровьего молока на альпийских пастбищах. В технологическую линию включены кроме доения и первичной обработки молока операции по поддержанию плодородия и состояния почвы пастбищных угодий с утилизацией отходов жизнедеятельности поголовья при доильном центре.

Ключевые слова: альпийские пастбища, коровье молоко, механизированное производство, доение, первичная обработка, охлаждение, замкнутый цикл, эффективность.

■ **Для цитирования:** Барагунов А.Б., Кудаяев З.Р. Технические решения для механизированного производства продуктов животноводства в условиях альпийских пастбищ // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2025. Т. 19. №4. С. 84-90. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-4-84-90. EDN: QAJHBT.

Scientific article

Technical Solutions for Mechanized Livestock Production under Alpine Pasture Conditions

Albert B. Baragunov,
Dr.Sc.(Eng.), associate professor,
e-mail: baragun_albert@mail.ru;

Zalimkhan R. Kudaev,
senior lecturer,
e-mail: zalimhan007@mail.ru

Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov, Nalchik, Kabardino-Balkar Republic, Russian Federation

Abstract. The production of drinking milk under alpine pasture conditions presents a number of specific features and challenges. The lack of specialized technical equipment for milk collection and primary processing can lead to economic losses, even in regions with ecologically clean environments and abundant natural forage resources. (*Research purpose*) To develop technical solutions and a closed-cycle technology for the production of drinking cow's milk under alpine pasture conditions. (*Materials and methods*) The study examines the key aspects of organizing a closed-cycle milk production system that employs technical

equipment for milking and primary milk processing, powered by a renewable energy source – mountain glacial rivers. The proposed technical solutions are patent-protected, and prototype units have been successfully tested on mountain farms in the Kabardino-Balkar Republic. (*Results and discussion*) The proposed milking equipment is specifically designed to ensure gentle handling of cows' teats during the milking process. Freshly collected milk is transferred to a cooling unit that utilizes the natural cold of glacial mountain rivers. The initial quality of the milk met Group 1 sanitary standards, with an average fat content of 3.65% and a bacterial count of 280,700 microorganisms per milliliter. The average daily milk yield was 12.5 kilograms per cow in a herd of 100 cows. The milk is cooled within 25 minutes, and its temperature is maintained until further transportation or processing. This approach provides optimal storage conditions for milk production in mountainous regions. (*Conclusions*) The implementation of the proposed technical solutions significantly improves the profitability of cow milk production under alpine pasture conditions. In addition to milking and primary milk processing, the technological system also incorporates operations aimed at maintaining soil fertility and pasture sustainability through the utilization of livestock waste at the milking center.

Keywords: alpine pastures, cow milk, mechanized production, milking, primary processing, cooling, closed cycle, efficiency.

■ **For citation:** Baragunov A.B. Kudaev Z.R. Technical solutions for mechanized livestock production under alpine pasture conditions. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N4. 84-90 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-4-84-90. EDN: QAJHBT.

Альпийские луга относятся к категории горных пастбищ, имеющих высокую экологическую и качественно кормовую оценку с точки зрения производства молока и молочной продукции во всем мире [1, 2]. Сложности ведения на таких территориях отечественного животноводства и производства коровьего молока заключаются в следующем:

- отдаленность альпийских доильных центров (АДЦ) от районных центров распределения энергетических коммуникаций;
- отсутствие серийных доильных аппаратов, адаптированных к условиям пониженного атмосферного давления;
- отсутствие проработанных технологических мероприятий по скоординированному обслуживанию участков для выпаса, прилегающих к пастбищному доильному центру;
- трудности с доставкой собранного молока в приемные и перерабатывающие пункты.

Обозначенные проблемы возможно решить с применением комплексных подходов на уровне разработки технических средств и технологических операций, объединенных в общую систему производственной группы [3].

Прежде всего такие меры обеспечат рациональное использование естественной кормовой базы, как важной составляющей в современных реалиях [4]. Для этого необходимо прорабатывать регламент эксплуатации и обслуживания кормовых угодий альпийских пастбищ.

Вторая задача состоит в обеспечении комплекса технических средств выведения и первичной обработки молока с использованием методов зеленой энергетики [5].

Природно-климатические условия размещения АДЦ позволяют адаптировать различные средства получения возобновляемой энергии в производ-

ственном процессе. Далее следует решить вопрос комплектования техническими средствами с адаптивными и щадящими элементами доения и имитацией естественного способа выведения молока.

Не менее важен аспект организации на территории доильного центра сбора и утилизации отходов жизнедеятельности стада в периоды молоковыведения и ночного отдыха. Сложности сбора отходов связаны с беспривязным содержанием стада. Как показывает практика, загрязнение кожного покрова коров накладывает дополнительные трудозатраты по обслуживанию стада. Другая составляющая вопроса сбора и утилизации отходов касается организации схем внутреннего рециклинга и регенерации отходов, что позволит приблизить весь комплекс технологических процессов производства к замкнутой системе хозяйствования.

Система замкнутого производства связана с потреблением и переработкой природных ресурсов на основе принципа кругооборота материальных и энергетических веществ: природные ресурсы – производство – вторичное сырье – окружающая среда. Отличительные черты замкнутого производства – это ресурсо- и энергосбережение, воспроизводство сырья, широкое применение малоотходных технологических процессов [6].

Цель исследования. Разработка технических средств и технологии производства питьевого коровьего молока с внедрением безотходных методов в условиях альпийских пастбищ как высокоресурсных природных объектов хозяйствования в замкнутом цикле.

Материалы и методы. Разрабатываемую технологическую линию производства молока условно разделим на три блока: возобновляемое энергообеспечение («зеленая энергия»); обслуживание пастбища; обслуживание молочного поголовья (*рис. 1*). Составляющие этих блоков можно объединить в

замкнутую цепь операций, обеспечивающих безотходное функционирование системы: пастбище – молочное стадо – доильный центр (Китаёва О.В. Математические модели технологического и технического обеспечения молочного скотоводства. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, 2024. 289 с.). Такая система должна быть тесно взаимосвязана для обеспечения основного направления хозяйствования – получения высококачественного питьевого молока, а также производства сопутствующих обеззараженных органических удобрений для обогащения почвы на пастбищах и реализации излишков удобрений внешним потребителям.

Исследуемая природная территория характеризуется высококачественной кормовой базой и водными ресурсами с технологически привлекательными параметрами. В частности, горные реки можно использовать для технологических нужд АДЦ (поение животных, подготовительные и заключительные операции при доении коров, охлаждение и хранение молока), а также подачи на механический привод неэнергоёмких устройств. Особое внимание в исследовании уделено технологическим операциям замкнутого цикла, которые обеспечивают безопасность и сохранение ценных свойств коровьего молока.

Свежесырое молоко от здоровой коровы не является опасным для пищевых целей. Однако если молоко получено от больных животных, то его использование запрещено ГОСТ 31449-2013 «Молоко коровье сырое. Технические условия», в частности по уровню соматических клеток (ГОСТ 23453-2014 «Молоко сырое. Методы определения соматических клеток»), по которому определяется наличие воспалительных заболеваний молочной железы коров (мастит), спровоцированных травмированием вымени при машинном доении. По этой причине предлагается использовать щадящие доильные устройства, имитирующие механику ротового аппарата теленка. Кроме того, разработано решение по адаптации вакуумметрического давления в доильном аппарате к допустимым зоотехническим пределам в условиях разреженной атмосферы. Такое нововведение дополнительно способствует повышению качества сырого молока.

Молоко сразу после дойки в течение определенного времени обладает бактерицидными свойствами (бактерицидная фаза), препятствующими размножению микроорганизмов. Для сохранения качества до поступления в молокоприемные пункты необходимо предотвратить развитие микроорганизмов, вызывающих порчу молока [7, 8]. Продолжительность бактерицидной фазы зависит от индивидуальных особенностей животных, состава первичной микрофлоры (бактерий) и условий хранения молока.

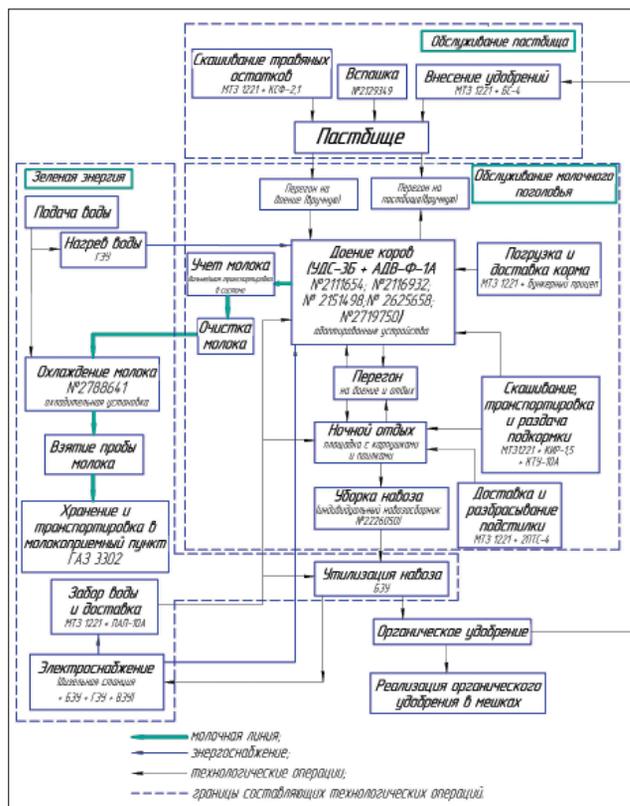


Рис. 1. Схема производства питьевого коровьего молока в замкнутом цикле для условий альпийских пастбищ
Fig. 1. Diagram of the closed-cycle production system for drinking cow's milk under alpine pasture conditions

Для увеличения длительности бактерицидной фазы должны быть обеспечены необходимые степень и скорость охлаждения молока. Согласно ГОСТ 31449-2013 молоко должно храниться не более 24 ч при температуре не выше +10 °С. С этой целью в условиях альпийских пастбищ используются различные аппаратные-конструктивные решения. Самым простым является применение бассейнов с проточной ледниковой водой, в которых размещают фляги с молоком. Параметр жесткости конструкции и геометрические размеры бассейна позволяют эффективно охлаждать молоко в флягах, которые погружены в непрерывный поток проточной воды.

Тем не менее, интенсивность и скорость охлаждения молока на альпийских пастбищах в данном случае не вполне удовлетворяет условиям, позволяющим сохранить начальный уровень обсемененности молока первичной микрофлорой (рис. 2). В связи с этим применяются специализированные охладители разных конструкций, которые подразделяются на две группы. К первой группе относятся открытые устройства с оросительной системой охлаждения. В этом случае молоко стекает по внешней поверхности теплообменных секций, а внутрь их подается охлаждающая вода.

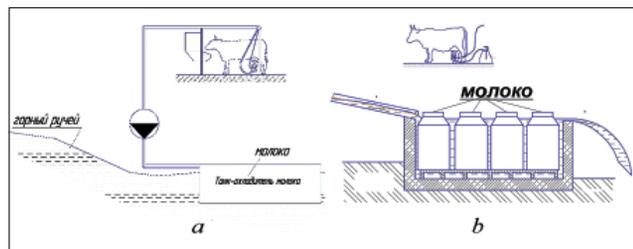


Рис. 2. Организация охлаждения молока в условиях пастбищных доильных центров: а – доение в молокопровод ($T = 4\text{ }^{\circ}\text{C}$); б – доение в ведра ($T = 4\text{ }^{\circ}\text{C}$): 1 – ручей; 2 – молоко; 3 – молочный танк; 4 – фляга (Патент RU 2788641 «Холодильная установка для охлаждения молока с использованием естественного холода»)

Fig. 2. Milk cooling arrangement in pasture-based milking centers: a – pipeline milking ($T = 4\text{ }^{\circ}\text{C}$); б – bucket milking ($T = 6\text{ }^{\circ}\text{C}$): 1 – stream; 2 – milk; 3 – milk tank; 4 – milk can (Patent RU 2788641. Refrigerator for cooling milk using natural cold)

Основной недостаток таких охладителей заключается в контакте молока с внешним воздухом, в результате происходит вторичное бактериальное загрязнение [9, 10].

Вторую группу охладителей молока составляют закрытые конструкции. На молочно-товарных фермах в нашей стране наиболее распространены компрессионные холодильные установки, двух типов: только для охлаждения молока и комбинированные для охлаждения и хранения [11, 12]. Установки первого типа работают и обычно используются во время доения. В них холодильный агрегат охлаждает воду в баке-аккумуляторе до 2-3 °С либо генерируется лед на панелях испарителя и подается на емкость с молоком. Подогретая в охладителе вода возвращается циркуляционным насосом в бак-аккумулятор. Для пастбищных альпийских доильных центров такой метод достаточно энергозатратный.

Другой тип установок предназначен для охлаждения и последующего хранения молока, в них

также используется бак-аккумулятор холодной воды или получение льда. Охлажденная вода циркулирует или орошает емкость с молоком, обеспечивая его охлаждение, при этом молоко может дополнительно перемешиваться для ускорения процесса.

Различные методы охлаждения молока требуют значительных энергозатрат, а также могут быть связаны с применением экологически небезопасных хладагентов. Современные мировые тенденции в разработке технологий направлены на использование нетрадиционных и возобновляемых источников энергии. Данное направление совершенствования охлаждения молока выбрано в разрабатываемой нами технологии [13].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. С целью применения естественных ледниковых вод (таблица) проведено обследование горных рек Зольского района Кабардино-Балкарской Республики, протекающих через горные пастбища, и возможное размещение доильных центров.

Рассматриваемый водный ресурс по температурному диапазону представляет интерес с точки зрения использования охлаждения молока от скота, пасущегося на окрестных горных участках, площадь которых в целом по республике составляет около 400 тыс. га.

Используя рельеф местности и возобновляемый источник энергии горной реки, можно организовать доильный центр с системой охлаждения молока (рис. 3).

Для интенсификации процесса теплообмена в охладительной установке за счет вращения водяного колеса 9 и мешалки 5 создается перемещение молока в резервуаре-теплообменнике 3.

Процесс охлаждения молока с использованием температуры горной реки в резервуаре с периодическим перемешиванием описывается математическим выражением [14] при скорости хладоносителя 0,2-1 м/с:

Таблица		Table	
ХАРАКТЕРИСТИКА ВЫБОРКИ ГОРНЫХ РЕК / CHARACTERISTICS OF SELECTED MOUNTAIN RIVERS			
Название реки	Исток реки	Высота над уровнем моря, м	Температура воды на горном участке, °С*
Екепцоко	Склон горы Бгюх	1400	4-6,5
Золка	Северное подножье Дженалского хребта	1500	4-6,5
Кичмалка	Ледник северного склона Эльбруса	3200	3,5-5
Лахран	Склон горы. Уллу-Лахран	1883	4-5,5
Мозеха	Склон горы Мозеха	1300	4-6,5
Малка	Северный склон Эльбруса	2500	4-5,5
Уллу-Таллыкол	Северный склон Эльбруса	2300	4-5,5
Шаукол	Начало из небольшого озера на перевале Шаукам	2925	4-5

*В теплый период года.

$$T_{\text{охл}} = \frac{F \cdot c_m \cdot \rho_m \cdot V \cdot (\ln|t_b - t_{\text{м.н}}| - \ln|t_b - t_{\text{м.к}}|)}{\alpha}$$

где F – площадь поверхности теплообмена, м^2 ; c_m – удельная теплоемкость молока, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$; ρ_m – плотность молока, $\text{кг}/\text{м}^3$; V – объем резервуара, м^3 ; t_b – температура воды, $^\circ\text{C}$; $t_{\text{м.н}}$ и $t_{\text{м.к}}$ – начальная и конечная температура молока, $^\circ\text{C}$; α – коэффициент теплопередачи.

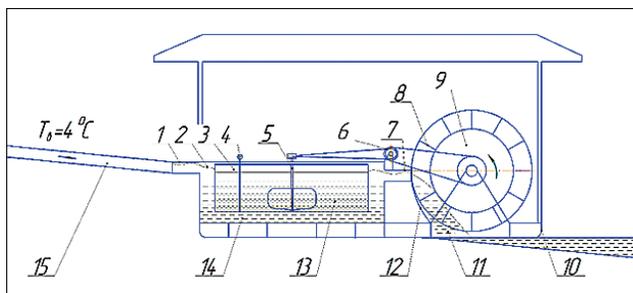


Рис. 3. Охлаждающая установка молока естественным холодом горной реки (Патент RU 2788641): 1 – входной патрубок; 2 – охлаждающая рубашка; резервуар-теплообменник; 4 – температурный датчик; 5 – мешалка; 6 – передаточный механизм; 7 – выходной патрубок; 8 – лопасть; 9 – водяное колесо; 10 – салазки; 11 – отработанная вода; 12 – направляющая; 13 – молоко; 14 – речная вода; 15 – речной рукав

Fig. 3. Milk cooling unit utilizing the natural cold of a mountain river (Patent RU 2788641): 1 – inlet pipe; 2 – cooling jacket; 3 – reservoir–heat exchanger; 4 – temperature sensor; 5 – agitator; 6 – transmission mechanism; 7 – outlet pipe; 8 – blade; 9 – water wheel; 10 – sled runners; 11 – discharged water; 12 – guide rail; 13 – milk; 14 – river water; 15 – diverted river channel

Изготовлены экспериментальные образцы резервуара охлаждения цилиндрической формы с соотношениями диаметра и длины 0,67; 0,38; 0,17. Образцы устанавливались на специальных салазках на оборудованной площадке с забором воды из горной ледниковой реки. В зависимости от используемого устройства водозабора и скорости потока воды в реке скорость охлаждающей жидкости варьировалась от 0,2 до 1,0 м/с. Для увеличения эффективности теплопередачи предусмотрено перемешивающее устройство охлаждаемого молока. Для замеров температуры молока в резервуаре устанавливался датчик, а также фиксировалось время охлаждения молока.

Температура молока в начале процесса охлаждения составляла 35°C и из доильной установки УДС-ЗБ поступала через молокопровод в резервуар для охлаждения [12]. По начальной степени чистоты молоко относилось к 1-й группе, средняя жирность составила 3,65%, бактериальная обсемененность – 280,7 тыс. микроорганизмов на 1 мл. Удой от коровы в среднем составлял 12,5 кг, общее поголовье – 100 коров.

В экспериментальной установке молоко охлаждается в течение 25 мин, после чего температура поддерживается до последующей переработки. Этот процесс вполне приемлем для охлаждения и хранения молока в условиях альпийских доильных центров.

Рассматриваемый способ успешно интегрирован в общую технологическую линию производства питьевого коровьего молока в условиях альпийских пастбищ. Отличительными элементами технологии являются: замкнутая система производства молока, ресурсо- и энергосбережение, воспроизводство сырья, применение малоотходных технологических процессов [15].

В частности, один из элементов технологии производства питьевого коровьего молока в замкнутом цикле в условиях альпийских пастбищ – получение «зеленой энергии» (см. рис. 1) обеспечивает охлаждение и хранение молока на основе возобновляемого источника энергии – горной ледниковой реки. Процесс теплообмена интенсифицируется путем перемешивания молока за счет передачи механической энергии потока реки на вращение водяного колеса и работу мешалки.

Кроме этого составляющие технологическую линию замкнутого цикла блоки «Обслуживание пастбища» и «Обслуживание молочного поголовья» обеспечивают энергетическую, агротехническую, в конечном итоге экономическую прибыль при утилизации отходов жизнедеятельности молочного стада с применением в перспективе роботизированных и энергосберегающих технологий [16].

Выводы. В условиях горных пастбищ России молочное животноводство имеет значительный потенциал, благодаря природным ресурсам, таким как качественная кормовая база и возобновляемые источники энергии в виде альпийских пастбищ и прилегающих ледниковых рек. Повысить эффективность использования этих ресурсов и рентабельность в молочном производстве возможно за счет применения возобновляемой энергии рек, что позволит существенно сократить энергозатраты и материалоёмкость процесса.

Предлагаемая оригинальная технология производства молока в альпийских доильных центрах с набором технических средств, адаптированных к особенностям условий содержания дойного стада в замкнутом цикле, позволяет: сократить травматизм при использовании машинного доения на 40%; повысить жирность молока на 0,35 %; снизить энергопотребление на 15%.

Внедрение данной технологии в производственный процесс будет способствовать поддержанию плодородия и состояния почвы пастбищных угодий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Апажев А.К., Шекихачев Ю.А., Хажметов Л.М. и др. Повышение эксплуатационной надежности сельскохозяйственных машин // *Техника и оборудование для села*. 2023. N4 (310). С. 12-16. DOI: 10.33267/2072-9642-2023-4-12-16.
2. Барагунов А.Б. Предложения по совершенствованию технологии производства продукции молочного животноводства в горных условиях Северо-Кавказского федерального округа // *Вестник аграрной науки Дона*. 2019. N4 (48). С. 35-42.
3. Ерохин М.Н., Дорохов А.С., Кирсанов В.В., Чепурина Е.Л. Концепция построения регионального многофункционального сервисного центра по молочному животноводству // *Агроинженерия*. 2021. N1(101). С. 4-10. DOI: 10.26897/2687-1149-2021-1-4-10.
4. Барагунов А.Б., Краснова А.Ю., Пасечников И.И. Организация доильной станции применительно к условиям горного пастбищного содержания коров // *Вестник аграрной науки Дона*. 2020. N2 (50). С. 43-50. EDN: NHPIED.
5. Мазитов Н.К., Шогенов Ю.Х., Ценч Ю.С. Сельскохозяйственная техника: решения и перспективы // *Вестник ВИЭСХ*. 2018. N3(32). С. 94-100. EDN: YLWHAL.
6. Дорохов А.С., Павкин Д.Ю., Юрочка С.С. Технология цифровых двойников в сельском хозяйстве: перспективы применения // *Агроинженерия*. 2023. Т. 25. N4. С. 14-25. DOI: 10.26897/2687-1149-2023-4-14-25.
7. Барагунов А.Б. Исследование холодильной установки коровьего молока для условий горных пастбищ Северного Кавказа // *Вестник аграрной науки Дона*. 2022. Т. 15. N2(58). С. 29-38. DOI: 10.55618/2075670_4_2022_15_2_29-38.
8. Козловцев А.П., Шахов В.А., Фомин М.Б. и др. Система аккумуляции и использования природного холода годовой потребности и результаты исследования et функционирования // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2021. N3(89). С. 177-181. DOI: 10.37670/2073-0853-2021-89-3-177-181.
9. Герасимова О.А. Повышение эффективности производства молока при пастбищном содержании коров // *Известия Великолукской ГСХА*. 2017 (юбилейный выпуск). С. 34-40. EDN: YLSEGO.
10. Ценч Ю.С., Несмиян А.Ю., Хомутова Н.С. История развития конструкции высевальных аппаратов зерновых сеялок // *Вопросы истории естествознания и техники*. 2020. Т. 41. С. 102-117. DOI: 10.31857/S020596060008429-3.
11. Забродина О.Б., Таран Е.Н., Матвейкин М.Ю. Экспериментальная установка для оценки параметров и режимов работы устройства для контроля отклонений содержания жира в молоке в потоке // *Актуальные проблемы энергетики АПК*. 2017. С. 69-72. EDN: ZQZAVR.
12. Фомин М.Б., Козловцев А.П., Мартынов В.М. и др. Охлаждение молока на животноводческих фермах: современное состояние и перспективы развития // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2021. N1 (87). С. 134-139. EDN: YSFFVZ.
13. Кормановский Л.П., Иванов Ю.А., Цой Ю.А., Кирсанов В.В. Некоторые научные и технологические обоснования и рекомендации для создания молочных фермерских хозяйств // *Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства*. 2019. Т. 1 (33). С. 21-26.
14. Краснов И.Н., Капустин И.В., Краснова А.Ю., Мирошникова В.В. Производство молока на ферме модульного типа с экологически чистой технологией // *Вестник АПК Ставрополя*. 2012. N2. С. 45-50. EDN: PBRZVZ.
15. Барагунов А.Б. Адаптированные технические средства и технология молочного животноводства в условиях альпийских пастбищ // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. N1. С. 108-114. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-1-108-114.
16. Дорохов А.С., Никитин Е.А., Павкин Д.Ю. Колесные роботизированные технические средства: опыт и перспективы использования на животноводческих комплексах // *Техника и оборудование для села*. 2022. N4(298). С. 16-21. DOI: 10.33267/2072-9642-2022-4-16-21.

REFERENCES

1. Apazhev A.K., Shekihachev Yu.A., Khazhmetov L.M. et al. Improving the operational reliability of agricultural machines. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2023. No. 4 (310). 12-16 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2023-4-12-16.
2. Baragunov A.B. Recommendations for improvement of production technology of dairy animal farming in mountain conditions of the North Caucasian federal district. *Don Agrarian Science Bulletin*. 2019. N4 (48). 35-42 (In Russian).
3. Erokhin M.N., Dorokhov A.S., Kirsanov V.V., Chepurina E.L. Conceptual grounds for the construction of a regional multifunctional service center for dairy livestock. *Agricultural Engineering*. 2021. N1(101). 4-10 (In Russian). DOI: 10.26897/2687-1149-2021-1-4-10.
4. Baragunov A.B., Krasnova A.Yu., Pasechnikov I.I. Organization of the milking station to the conditions of mountain pastural content of cows. *Don Agrarian Science Bulletin*. 2020. N2 (50). 43-50 (In Russian). EDN: NHPIED.
5. Mazitov N.K., Shogenov Yu.Kh., Tsench Yu.S. Agricultural machinery: solutions and prospects. *Vestnik VIESKH*. 2018. N3(32). 94-100 (In Russian). EDN: YLWHAL.
6. Dorokhov A.S., Pavkin D.Yu., Yurochka S.S. Digital twin technology in agriculture: prospects for use. *Agricultural Engineering*. 2021. N1(101). 26-35 (In Russian). DOI: 10.26897/2687-1149-2021-1-26-35.
7. Baragunov A.B. The research of a cow's milk refrigeration unit for the conditions of mountain pastures of the North

- Caucasus. *Don Agrarian Science Bulletin*. 2022. Vol. 15. N2 (58). 29-38 (In Russian). DOI: 10.55618/20756704_2022_15_2_29-38.
8. Kozlovtssev A.P., Shakhov V.A., Fomin M.B. et al. The system of accumulation and use of natural cold of the annual demand and the results of the study of its functioning. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2021. N3(89). 177-181 (In Russian). DOI: 10.37670/2073-0853-2021-89-3-177-181.
 9. Gerasimova O.A. Increasing the efficiency of milk production with pasture keeping of cows. *Izvestiya of Velikiye Luki State Agricultural Academy*. 2017 (anniversary issue). 34-40 (In Russian). EDN: YLSEGO.
 10. Tsench Yu.S., Nesmiyan A.Yu., Khomutova N.S. The history of development of seed-feeding devices on grain drills. *Studies in the History of science and Technology*. 2020. Vol. 41. 102-117 (In Russian). DOI: 10.31857/S020596060008429-3.
 11. Zabrodina O.B., Taran E.N., Matveykin M.Yu. Experimental setup for assessing the parameters and operating modes of a device for monitoring deviations in the fat content of milk in the flow. *Actual Problems of Energy in the Agro-Industrial Complex*. 2017. 69-72 (In Russian). EDN: ZQZAVR.
 12. Fomin M.B., Kozlovtssev A.P., Martynov V.M. et al. Milk cooling at livestock farms: current state and development prospects. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2021. N1(87). 134-139 (In Russian). EDN: YSFFVZ.
 13. Kormanovsky L.P., Ivanov Yu.A., Tsoi Yu.A., Kirsanov V.V. Some of the scientific and technological justifications and recommendations for dairy farms' creation. *Journal of VNIIMZH*. 2019. N1(33). 21-26 (In Russian).
 14. Krasnov I.N., Kapustin I.V., Krasnova A.Yu., Miroshnikova V.V. Milk production on a modular farm with environmentally friendly technology. *Agricultural Bulletin of Stavropol Region*. 2012. N2. 45-50 (In Russian). EDN: PBRZVZ.
 15. Baragunov A.B. Adapted technical means and technology of dairy farming in alpine pastures. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N1. 108-114 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-1-108-114.
 16. Dorokhov A.S., Nikitin E.A., Pavkin D.Yu. Wheeled robotic technical tools: experience and prospects of use at livestock complexes. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2022. N4(298). 16-21 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2022-4-16-21.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Барагунов А.Б. – разработка технических средств и технологии производства молока в условиях альпийских пастбищ;

Кудаев З.Р. – разработка технических средств и методики эксплуатации установки для охлаждения молока.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Baragunov A.B. – development of technical equipment and technology for milk production under alpine pasture conditions;

Kudaev Z.R. – development of technical equipment and operational methodology for the milk cooling system.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию
Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on
The paper was accepted for publication on

01.08.2025
24.10.2025

EDN: AYYRVH

DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-4-91-97



Научная статья

УДК 620.16



Установка для ускоренных испытаний рабочих органов машин в животноводстве

Дмитрий Михайлович Скороходов,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: d.skorokhodov@rgau-msha.ru;

Александр Сергеевич Павлов,
соискатель,
e-mail: pavlov810720@mail.ru

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А.Тимирязева, Москва, Российская Федерация

Реферат. Разработка отечественных технологий повышения надежности сельскохозяйственной техники, в том числе сборных элементов, узлов, механизмов и отдельных деталей, составляет один из важных этапов сельскохозяйственного производства. С целью выбора износостойкого материала при изготовлении рабочих органов и оценки эффективности упрочняющих технологий их рабочих поверхностей под конкретные условия эксплуатации необходимо проводить ускоренные ресурсные испытания соответствующими современными методами и средствами. (*Цель исследования*) Разработать установку, обеспечивающую ускоренные испытания на коррозионно-механическое изнашивание рабочих органов сельскохозяйственных машин и оборудования, применяемых в животноводстве при изготовлении и подготовке кормов. (*Материалы и методы*) Разработана методика ресурсных испытаний режущих элементов сельскохозяйственных машин для животноводства и кормопроизводства. Представлены кинематическая схема установки и возможная фиксация рабочих органов на рабочем валу установки. Дана оценка уровня механического и коррозионного изнашивания рабочих органов при ускоренных ресурсных испытаниях. (*Результаты и обсуждение*) Модуль управления установкой включает в себя электрическую схему и пульт управления, позволяющий регулировать частоту вращения испытуемых рабочих органов, изменение направления вращения (прямое и обратное) вала установки, экстренное торможение. Выбраны электродвигатель установки, частота вращения вала. Рассчитаны параметры клиноременной передачи привода установки: тип и количество ремней, диаметры ведущего и ведомого шкивов, передаточное число, обеспечивающие необходимую частоту вращения вала. Проведен прочностной расчет в случае заклинивания рабочего вала одним из держателей среднего ряда ножей, подтверждающий прочностной запас. (*Выводы*) Предлагаемая установка обеспечивает ускоренные ресурсные испытания рабочих органов машин и оборудования, позволяет оценивать эффективность технологий упрочнения рабочих поверхностей. Суть методики заключается в определении коррозионно-механического изнашивания рабочих органов в субстрате, имитирующем физико-химические свойства растительной среды, при осуществлении процесса резания в установленных режимах испытаний. Предлагаемая установка полностью соответствует прочностным характеристикам и сохранит свою работоспособность при возможных перегрузках.

Ключевые слова: производство кормов, установка, автоматизация, ускоренные испытания, рабочие органы, упрочняющие технологии, методы и средства.

■ **Для цитирования:** Скороходов Д.М., Павлов А.С. Установка для ускоренных испытаний рабочих органов машин в животноводстве // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2025. Т. 19. №4. С. 91-97. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-4-91-97. EDN: AYYRVH.

Scientific article

Accelerated Testing Installation for Working Parts of Livestock Machinery

Dmitry M. Skorokhodov,
Ph.D.(Eng.), associate professor,
e-mail: d.skorokhodov@rgau-msha.ru;

Aleksandr S. Pavlov,
Ph.D. applicant (Eng.),
e-mail: pavlov810720@mail.ru

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation

Abstract. The development of domestic technologies aimed at improving the durability of agricultural machinery, including assemblies, units, mechanisms, and individual parts, represents a key stage in agricultural production in the Russian Federation. To select wear-resistant materials for manufacturing working parts and to evaluate the effectiveness of surface strengthening technologies under specific operating conditions, it is essential to conduct accelerated service life tests using modern methods

and tools. (*Research purpose*) To design a testing installation for accelerated corrosion-mechanical wear testing of working parts used in agricultural machinery and livestock equipment, particularly those involved in feed production and preprocessing. (*Materials and methods*) A methodology was developed for service life testing of cutting elements used in agricultural machinery for livestock and feed production. The study presents a kinematic diagram describing the testing installation, outlines possible mounting configurations for the working parts on the installation's shaft, and assesses the levels of mechanical and corrosion wear experienced by the working parts under accelerated testing conditions. (*Results and discussion*) The control module of the installation includes an electrical schematic and a control panel which enables the regulation of shaft rotation frequency, selection of rotation direction (forward and reverse), and emergency braking. The electric motor was selected and the target shaft rotation frequency specified. Parameters of the V-belt transmission drive system, including belt type and quantity, diameters of the drive and driven pulleys, and transmission ratio, were calculated to ensure the required shaft speed. A strength calculation was performed to simulate a potential jamming scenario involving one of the middle-row knife holders and the results confirmed an adequate safety margin. (*Conclusion*) The proposed installation enables accelerated service life testing of working parts in machinery and equipment and allows evaluation of the effectiveness of surface hardening technologies. The testing methodology is based on determining corrosion-mechanical wear in a substrate that simulates the physicochemical properties of plant environments under specified cutting process conditions. The proposed installation complies with the required strength parameters and maintains its functionality even under potential overloads.

Keywords: feed production, installation, automation, accelerated testing, working parts, working bodies, surface hardening technologies, methods and tools.

■ **For citation:** Skorokhodov D.M., Pavlov A.S. Accelerated testing installation for working parts of livestock machinery. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N4. 91-97 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-4-91-97. EDN: AYYRVH.

Импортозамещение сельскохозяйственной техники и всех компонентов, связанных с ее техническим обслуживанием, является одной из основных задач. Ее решение во многом зависит от успешной модернизации инженерной службы агропромышленного комплекса в рамках создания отечественной техники [1]. Разработка отечественных технологий повышения надежности техники, в том числе сборных элементов, узлов, механизмов и отдельных деталей, составляет важный этап научных и инженерных исследований [2].

В настоящее время большинство парка сельскохозяйственной техники в Российской Федерации зарубежного производства. По данным Министерства сельского хозяйства, ее доля в животноводстве достигает 95%. Рабочие органы тоже импортные, они изготовлены из износостойких и прочных материалов, двукратно превосходящих отечественные. В условиях санкций особенно остро стоит вопрос о импортозамещении дорогостоящих рабочих органов с высокими показателями надежности и работоспособности [3].

С целью выбора износостойкого материала для рабочих органов сельскохозяйственных машин под конкретные условия эксплуатации необходимо проводить ускоренные ресурсные испытания [4, 5].

Увеличить ресурс рабочих органов путем упрочнения их рабочей поверхности возможно различными способами, как это показано, например, в [6-8]. В частности, важно проводить исследования износостойкости [9] ножей в оборудовании для получения растительных кормов, и оценку эффективных

методов их упрочнения [10, 11]. Для определения целевых параметров в режиме реального времени необходимы современные методы и средства, которые могут быть автоматизированы [12], в том числе с внедрением цифровых технологий [13, 14]. Автоматизация позволяет управлять исследовательским технологическим процессом [15] с минимальным участием человека.

Цель исследования: разработать установку, обеспечивающую ускоренные испытания на коррозионно-механическое изнашивание рабочих органов сельскохозяйственных машин и оборудования для животноводства.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Проведенный анализ различных методов по испытаниям режущих элементов на абразивный и коррозионный износ послужил основой для создания новой методики ресурсных испытаний режущих элементов машин, используемых в животноводстве и кормопроизводстве. Данная методика утверждена и внедрена в мае 2025 г. ФГБУ «Государственный испытательный центр» и ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» (Ерохин М.Н., Казанцев С.П., Скороходов Д.М. и др. Методика ресурсных испытаний режущих элементов сельскохозяйственных машин для животноводства и кормопроизводства. М.: Российский государственный аграрный университет, 2025. 28 с.). Эта методика позволяет оценивать ресурс работы режущих элементов, изготовленных из различных материалов, и определять наиболее эффективные упрочняющие технологии.

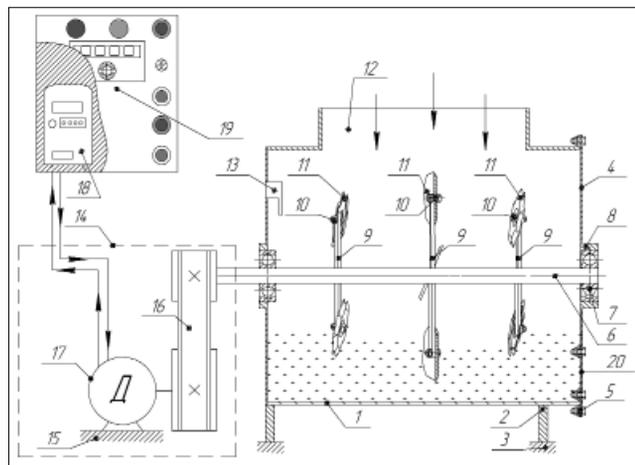


Рис. 1. Кинематическая схема установки для ресурсных испытаний на коррозионно-механический износ рабочих органов

Fig. 1. Kinematic diagram of the installation for service life testing of machine working elements under corrosion-mechanical wear

Согласно новой методике, в РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева на кафедре сопротивления материалов и деталей машин разработана установка для проведения стендовых ускоренных ресурсных испытаний (патент RU 2842437). Кинематическая схема установки приведена на *рисунке 1*.

В состав установки входят: корпус 1; стойки 2, смонтированные на опоре 3; крышка 4, закрепленная при помощи болтового соединения 5 на корпусе, для монтажа и демонтажа вращающегося вала 6. Вал закреплен в подшипниках 7, установленных во втулках 8; к валу под углом 90° друг к другу приварены держатели 9, к ним при помощи болтового соединения 10 прикреплены испытываемые режущие элементы 11.

Установка оснащена датчиком влажности 13; приводным механизмом 14 на опоре 15, включающим ременную передачу 16 и электродвигатель 17; частота вращения вала регулируется с помощью частотного преобразователя, установленного в модуле управления 19.

Методика предусматривает проведение ускоренных ресурсных испытаний режущих элементов в субстрате, имитирующем физико-химические свойства растительной среды.

Основными компонентами загружаемого субстрата являются: древесные опилки крупной фракции (от 3,0 до 5,5 мм); мелкозернистый кварцевый песок (от 0,1 до 0,25 мм); кислотные добавки (молочная, пропионовая, уксусная и масляная кислоты). Влажность среды в пределах 10-90%. Измельчаемый субстрат загружается через окно 12 и выгружается через окно 20.

Особенностью данной установки является возможность испытаний одновременно нескольких (до

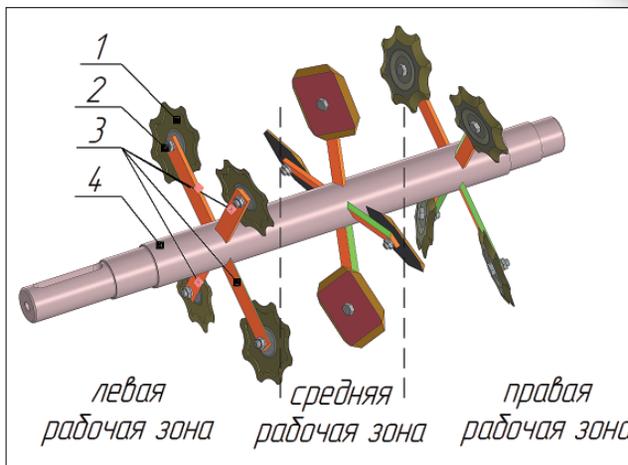


Рис. 2. Фиксация рабочих органов на валу установки: 1 – испытываемые режущие элементы; 2 – болтовое соединение; 3 – держатель; 4 – вал

Fig. 2. Mounting of the tested working elements on the shaft of the installation: 1 – tested cutting elements; 2 – bolted connection; 3 – holder; 4 – shaft

12 шт.) режущих элементов при одинаковых условиях (*рис. 2*). Это позволяет оценивать коррозионно-механическое изнашивание ножей из разных материалов, в том числе эффективность технологий, упрочняющих рабочих поверхностей. Дополнительно возможно проводить анализ и оптимизацию процесса резания [16].

Каждый держатель сконструирован под определенным углом, что приближает испытания к реальным условиям смешивания субстрата в процессе работы установки.

Оценка ресурса износа рабочих органов осуществляется согласно ГОСТ 23.205-79 «Обеспечение износостойкости изделий. Ускоренные ресурсные испытания с периодическим форсированием режима». Определяется массовый износ испытываемых образцов в зависимости от наработки, выполняется построение регрессионной модели износа [12, 17] рабочих органов с указанием их типа, материала и технологии упрочнения. По результатам измерений геометрических параметров рабочих органов выполняется построение сетки изнашивания рабочей поверхности деталей. Исследовать износ геометрических параметров можно с применением бесконтактных средств измерения на основе триангуляционного метода [18].

Оценка коррозионного изнашивания согласно ГОСТ 9.908-85 «Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости» проводится по степени поражения поверхности металла, вычисляется площадь коррозионного пятна, при необходимости выполняется металлографическая экспертиза коррозионных поражений с указанием типа коррозии.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Разработан модуль управления установкой (рис. 3), позволяющий регулировать частоту вращения испытуемых рабочих органов, изменять направление вращения вала (прямое и обратное), включать экстренное торможение (команда «СТОП»). Модуль предусматривает защиту электродвигателя от возможных перегрузок.

Установка для ускоренных испытаний на коррозионно-механический износ рабочих органов машин схожа по устройству с измельчителями кормов, в том числе по принципу работы, смесителями-кормораздатчиками. В связи с этим мощность электродвигателя выбрана по аналогичному (габаритам рабочей камеры) измельчителю кормов: $P_{дв} = 2,2$ кВт, частота вращения вала двигателя $n_{дв} = 750$ об/мин.

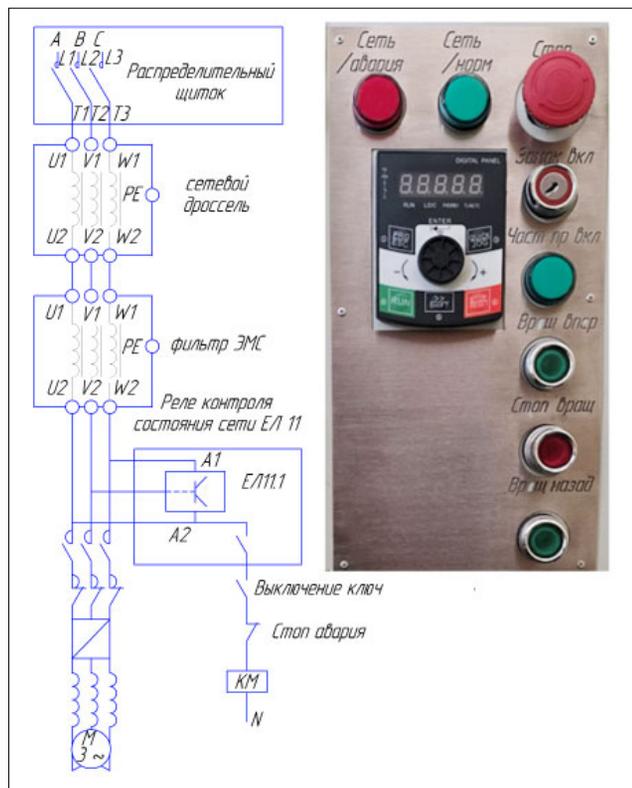


Рис. 3. Модуль управления установкой: слева – электрическая схема; справа – пульт управления
 Fig. 3. Control module of the installation electrical circuit diagram and control panel

Нужная частота вращения вала задается с использованием клиноременной передачи с передаточным числом $u_{рп} = 4$. Расчет клиноременной передачи осуществлялся в САПР «Компас-3D» с помощью библиотеки «Расчет механических передач». В результате расчета принята клиноременная передача со следующими параметрами: тип ремня А-1400 IV ГОСТ 1284.1-89; число ремней $z = 4$ шт.; диаметр ведущего шкива $D_1 = 80$ мм; диаметр ведомого шкива $D_2 = 320$ мм.

Определен крутящий момент на рабочем валу установки:

$$T_{рв} = \frac{9550 \cdot N \cdot \eta_{рп}}{n_2} = \frac{9550 \cdot 2,2 \cdot 0,95}{187,5} = 106,45 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

где 9550 – коэффициент перевода единиц измерений; N – мощность двигателя, кВт; $\eta_{рп}$ – КПД ременной передачи; n_2 – частота вращения рабочего вала, об/мин.

Изменение режима вращения рабочего вала за счет преобразователя частоты (ADV-M420) позволяет выбрать частоту, которая применяется в конкретных условиях измельчения кормов.

Диаметр конца рабочего вала установки:

$$d_{рв} = \sqrt[3]{\frac{10^3 \cdot T_{рв}}{0,2 \cdot [\tau]}} = \sqrt[3]{\frac{10^3 \cdot 106,45}{0,2 \cdot [10]}} \approx 40 \text{ мм},$$

где $[\tau]$ – допускаемое напряжение на кручение, МПа. Для валов из низкоуглеродистых сталей $[\tau] = 10\text{-}20$ МПа.

По диаметру вала и ширине шкива выбрана шпонка размером $12 \times 8 \times 56$ мм (ГОСТ 23360-78). Шпонка проверяется на смятие и срез:

$$\sigma_{см} = \frac{4 \cdot k_A \cdot T_{рв} \cdot 10^3}{d_{рв} \cdot h \cdot (l - b)} \leq [\sigma_{см}],$$

$$\tau_{ср} = \frac{2 \cdot k_A \cdot T_{рв} \cdot 10^3}{d_{рв} \cdot b \cdot (l - b)} \leq [\tau_{ср}],$$

где k_A – коэффициент динамической нагрузки. $k_A = 1,5$; b, h, l – ширина, высота и длина шпонки, мм; $[\sigma_{см}]$ – допускаемое напряжение смятия, МПа; $[\sigma_{см}] = 80\text{-}150$ МПа; $[\tau_{ср}]$ – допускаемое напряжение среза, МПа, $[\tau_{ср}] = 70\text{-}100$ МПа.

$$\sigma_{см} = \frac{4 \cdot 1,5 \cdot 106,45 \cdot 10^3}{40 \cdot 8 \cdot (56 - 12)} = 32,4 \text{ МПа},$$

$$\tau_{ср} = \frac{2 \cdot 1,5 \cdot 106,45 \cdot 10^3}{40 \cdot 12 \cdot (56 - 12)} = 10,8 \text{ МПа}.$$

Условие прочности шпоночного соединения выполняется.

Прочностной анализ рабочего вала установки выполнен в программе Solidworks Simulation (рис. 4). Максимальные напряжения возникнут в случае заклинивания рабочего вала одним из держателей среднего ряда ножей.

Как видно из анализа, максимальное напряжение в месте соединения держателя ножа и вала составляет 90 МПа; максимальная деформация – 0,154 мм; минимальный запас прочности – 1,615. Таким образом, рабочий вал соответствует условиям прочности с запасом, и установка сохранит работоспособность при заклинивании вала.

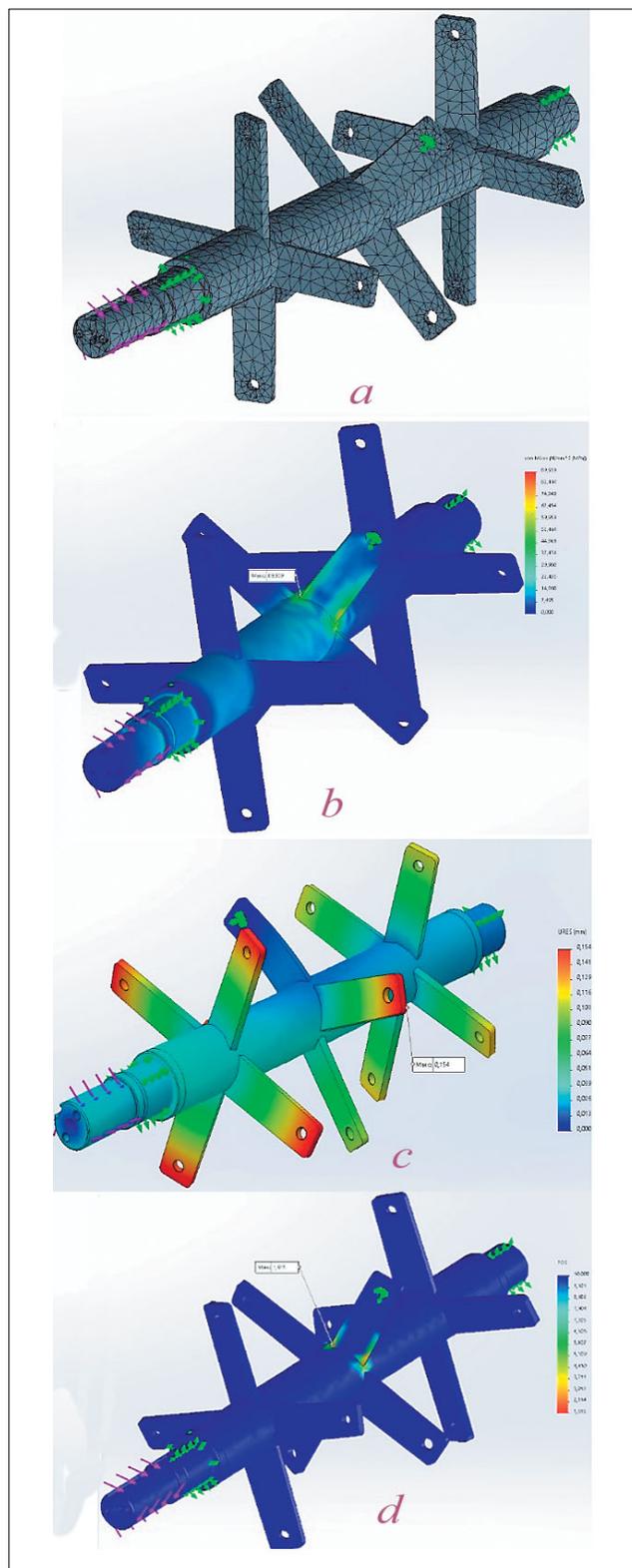


Рис. 4. Прочностной анализ рабочего вала установки в программе Solidworks Simulation: а – расчетная схема; б – напряжения; в – деформация под нагрузкой; д – запас прочности

Fig. 4. Strength analysis of the working shaft of the installation using Solidworks Simulation: а – calculation model; б – stress distribution; в – deformation under load; д – safety factor

Согласно кинематической схеме установки и проведенным расчетам создана работающая модель установки ускоренных испытаний на износ рабочих органов машин для измельчения и смешивания кормов (рис. 5).

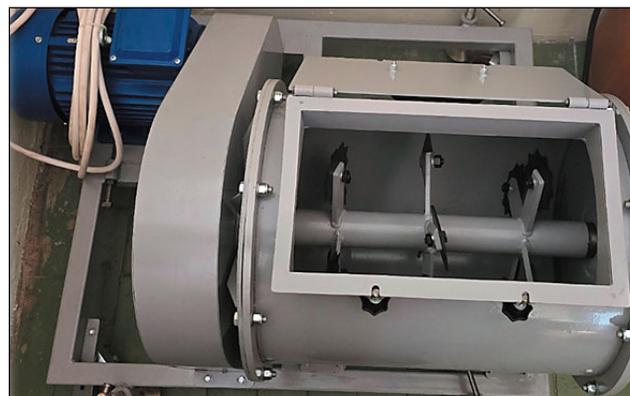


Рис. 5. Установка для ускоренных испытаний рабочих органов на коррозионно-механический износ
Fig. 5. Installation for accelerated testing of working parts for corrosion-mechanical wear

На базе кафедры сопротивления материалов и деталей машин РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева проводятся испытания на коррозионно-механическое изнашивание рабочих органов оборудования с целью выбора материала для их изготовления и определения эффективного метода упрочнения рабочих поверхностей. Это позволит внедрить в производство отечественные рабочие органы, не уступающие по ресурсу работы и долговечности зарубежным аналогам.

Выводы. Предлагаемая установка обеспечивает ускоренные ресурсные испытания рабочих органов, а также позволяет оценивать эффективность упрочняющих технологий рабочих поверхностей рабочих органов машин и оборудования.

Установка разработана согласно новой методике ресурсных испытаний режущих элементов сельскохозяйственных машин для животноводства и кормопроизводства, утвержденная и внедренная ФГБУ «Государственный испытательный центр». Суть методики заключается в определении коррозионно-механического изнашивания рабочих органов при измельчении субстрата, имитирующего физико-химические свойства растительной среды, при установленных режимах испытаний. Установка полностью соответствует необходимым прочностным характеристикам и сохранит свою работоспособность при возможных перегрузках.

Установка и методика представляют собой инструментально-методический комплекс для научных и инженерных исследований, направленных на повышение надежности, эффективности и долговечности сельскохозяйственной техники.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Катаев Ю.В., Герасимов В.С., Тишанинов И.А., Казакова В.А. Эволюция технического сервиса в агропромышленном комплексе // *Технический сервис машин*. 2024. Т. 62. N3. С. 47-52. DOI: 10.22314/2618-8287-2024-62-3-47-52.
2. Ценч Ю.С., Миронов Д.А., Пыжов В.В. Развитие методов восстановления деталей тракторных двигателей // *Технический сервис машин*. 2025. Т. 63. N1. С. 102-110. DOI: 10.22314/2618-8287-2025-63-1-102-110.
3. Ерохин М.Н., Гайдар С.М., Скороходов Д.М. и др. Износостойкость низколегированных сталей в абразивной среде // *Агроинженерия*. 2023. Т. 25. N3. С. 72-78. DOI: 10.26897/2687-1149-2023-3-72-78.
4. Федотов А.В., Дорохов А.С., Гвоздев А.А. Триботехнические материалы для технического обслуживания сельскохозяйственной техники // *Технический сервис машин*. 2022. N4(149). С. 37-45. DOI: 10.22314/2618-8287-2022-60-4-37-45.
5. Dorokhov A.S., Denisov V.A., Zadorozhny R.N. et al. The tribotechnical properties of electrosparks with a secondary bronze coating. *Coatings*. 2022. Vol. 12 (3): 312. DOI: 10.3390/coatings12030312.
6. Latypov R., Serov A., Serov N., Chekha O. Technology of hardening plowshares by electrocontact welding using waste from tool production. *Smart Innovation. Systems and Technologies*. 2022. Vol. 247. 197-203. DOI: 10.1007/978-981-16-3844-2_21.
7. Серов А.В., Серов Н.В., Бурак П.И. Функциональные покрытия // *Электрометаллургия*. 2020. N11. С. 25-33. DOI: 10.31044/1684-5781-2020-0-11-25-33.
8. Скороходов Д.М., Басов С.С., Денисов В.А., Свиридов А.С. Исследование микротвердостиборидных покрытий, полученных на стали 65Г из различных составов борлирующих смесей // *Технический сервис машин*. 2021. Т. 59. N2(142). С. 144-150. DOI: 10.22314/2618-8287-2021-59-2-144-150.
9. Лялякин В.П., Аулов В.Ф., Ишков А.В. и др. Исследование износостойкости ножей в период эксплуатации и оценка эффективных методов их упрочнения // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2024. N1. С. 97-106. DOI: 10.31857/S0235711924010117.
10. Сидоров С.А., Миронов Д.А., Ценч Ю.С., Миронова А.В. Оценка износостойкости и ресурса двухслойных хрупких почворезающих рабочих органов в различных почвенных условиях // *Инженерные технологии и системы*. 2020. Т. 30. С. 699-710. DOI: 10.15507/2658-4123.030.202004.699-710.
11. Lyalyakin V.P., Aulov V.F., Ishkov A.V. et al. Study of wear resistance of harvester knives during operation and evaluation of effective methods for hardening. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2024. Vol. 53. N1. 80-87. DOI: 10.1134/S1052618824010072.
12. Максимов П.Л., Иванов А.Г., Мохов А.А., Петров В.А. // *Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии*. 2015. N3(44). С. 32-38. EDN: UMXEZZ.
13. Дорохов А.С., Денисов А.В., Соломашкин А.А., Герасимов В.С. Стратегии технического обслуживания и ремонта сельскохозяйственных машин // *Технический сервис машин*. 2020. N3(140). С. 38-48. DOI: 10.22314/2618-8287-2020-58-3-38-48.
14. Лобачевский Я.П., Дорохов А.С. Цифровые технологии и роботизированные технические средства для сельского хозяйства // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Т. 15. N4. С. 6-10. DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10.
15. Измайлов А.Ю., Хорошенков В.К., Колесникова В.А. и др. Средства автоматизации для управления сельскохозяйственной техникой // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2017. N3. С. 3-9. DOI: 10.22314/2073-7599-2017-3-39.
16. Аулов В.Ф., Рожков Ю.Н., Ишков А.В. и др. Анализ и оптимизация процесса резания ножа измельчителя-разбрасывателя соломы зерноуборочного комбайна для увеличения его срока службы // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2023. N5(223). С. 70-78. DOI: 10.53083/1996-4277-2023-223-5-70-78.
17. Дородов П.В., Петров В.А., Торопов Л.А. Регрессионная модель износа рабочей поверхности лопастей барабана дробилки зерна серии ДКР // *Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии*. 2024. N3(79). С. 106-113. DOI: 10.48012/1817-5457-2024-3-106-113.
18. Скороходов Д.М., Краснящих К.А., Свиридов А.С. Использование бесконтактных методов и средств контроля для проверки качества запасных частей сельскохозяйственной техники // *Технический сервис машин*. 2020. N2(139). С. 141-148. DOI: 10.22314/2618-8287-2020-58-2-141-148.

REFERENCES

1. Kataev Yu.V., Gerasimov V.S., Tishaninov I.A., Kazakova V.A. Evolution of technical service in the agricultural industrial complex. *Machinery Technical Service*. 2024. Vol. 62. N3. 47-52 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2024-62-3-47-52.
2. Tsench Yu.S., Mironov D.A., Pyzhov V.V. Development of methods for restoring tractor engine parts. *Machinery Technical Service*. 2025. Vol. 63. N1. 102-110 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2025-63-1-102-110.
3. Erokhin M.N., Gaidar S.M., Skorokhodov D.M. et al. Wear resistance of low-alloy steels in an abrasive environment. *Agricultural Engineering*. 2023. Vol. 25. N3. 72-78 (In Russian). DOI: 10.26897/2687-1149-2023-3-72-78.
4. Fedotov A.V., Dorokhov A.S., Gvozdev A.A. Tribotechnical

- materials for the maintenance of agricultural machinery. *Machinery Technical Service*. 2022. N4(149). 37-45 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2022-60-4-37-45.
5. Dorokhov A.S., Denisov V.A., Zadorozhny R.N. et al. The tribotechnical properties of electrosprays with a secondary bronze coating. *Coatings*. 2022. Vol. 12 (3): 312 (In English). DOI: 10.3390/coatings12030312.
 6. Latypov R., Serov A., Serov N., Chekha O. Technology of hardening plowshares by electrocontact welding using waste from tool production. *Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2022. Vol. 247. 197-203 (In English). DOI 10.1007/978-981-16-3844-2_21.
 7. Serov A.V., Serov N.V., Burak P.I. Functional coatings. *Electrometallurgy*. 2020. N11. 25-33 (In Russian). DOI: 10.31044/1684-5781-2020-0-11-25-33.
 8. Skorokhodov D.M., Basov S.S., Denisov V.A., Sviridov A.S. Microhardness of boride coatings obtained on 65g steel from different compositions of borating mixtures. *Machinery Technical Service*. 2021. Vol. 59. N2(142). 144-150 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2021-59-2-144-150.
 9. Lyalyakin V.P., Aulov V.F., Ishkov A.V. et al. Study of wear resistance of harvester knives during operation and evaluation of effective methods for hardening. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2024. N1. 97-106 (In Russian). DOI: 10.31857/S0235711924010117.
 10. Sidorov S.A., Mironov D.A., Tsench Yu.S., Mironova A.V. Assessment of durability and service life of two-layer hardened earth cutters in various soil condition. *Engineering Technologies and Systems*. 2020. Vol. 30. 699-710 (In Russian). DOI: 10.15507/2658-4123.030.202004.699-710.
 11. Lyalyakin V.P., Aulov V.F., Ishkov A.V. et al. Study of wear resistance of harvester knives during operation and evaluation of effective methods for hardening. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2024. Vol. 53. N1. 80-87 (In English). DOI: 10.1134/S1052618824010072.
 12. Maksimov P.L., Ivanov A.G., Mokhov A.A., Petrov V.A. Possibilities of agricultural labor automation. *Bulletin of Izhevsk State Agricultural Academy*. 2015. N3(44). 32-38 (In Russian). EDN: UMXEZZ.
 13. Dorokhov A.S., Denisov A.V., Solomashkin A.A., Gerasimov V.S. Strategies of maintenance and repair of agricultural machinery. *Machinery Technical Service*. 2020. N3(140). 38-48 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2020-58-3-38-48.
 14. Lobachevskiy Ya.P., Dorokhov A.S. Digital technologies and robotic devices in the agriculture. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2021. Vol. 15. N4. 6-10 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10.
 15. Izmaylov A.Yu., Khoroshenkov V.K., Kolesnikova V.A. et al. Automation facilities for agricultural machinery control. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2017. N3. 3-9 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2017-3-39.
 16. Aulov V.F., Rozhkov Yu.N., Ishkov A.V. et al. Analysis and optimization of cutting process of straw chopper-spreader knife of grain harvester in order to increase its durability. *Bulletin of the Altai State Agrarian University*. 2023. N 5 (223). 70-7838 (In Russian). DOI: 10.53083/1996-4277-2023-223-5-70-78.
 17. Dorodov P.V., Petrov V.A., Toropov L.A. Regression model of wear of the working surface of blades of the DKR series grain crusher drum. *Bulletin of Izhevsk State Agricultural Academy*. 2024. N3 (79). 106-11338 (In Russian). DOI: 10.48012 / 1817-5457-2024-3-106-113.
 18. Skorokhodov D.M., Krasnyashchikh K.A., Sviridov A.S. Use of contactless methods and means for checking the quality of agricultural machinery spare parts. *Machinery Technical Service*. 2020. N2 (139). 141-148 (In Russian). DOI: 10.22314 / 2618-8287-2020-58-2-141-148.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Скорыходов Д.М. – научное руководство, постановка цели и формирование методики исследования, подготовка рукописи, анализ и доработка текста, формирование общих выводов;

Павлов А.С. – обобщение и описание результатов, визуализация материалов, подготовка рукописи, анализ литературных данных, формирование результатов исследования.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Skorokhodov D.M. – scientific supervision, formulation of the research objective and methodology, manuscript preparation, text analysis and revision, and development of general conclusions;

Pavlov A.S. – synthesis and description of results, visualization of materials, manuscript preparation, literature review, and development of research findings.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию

Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on

The paper was accepted for publication on

10.09.2025

28.11.2025