



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 16.03.2026
Формат 60x90/8. Объем 11,25 печ.л.
Тираж 500 экз
Отпечатано в типографии
ФГБНУ ФНАЦ ВИМ.

© ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, 2026

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 научно-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, Российская Федерация, https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=626708

Юрий Анатольевич Иванов

доктор сельскохозяйственных наук, профессор, академик Российской академии наук, главный научный сотрудник 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 направления 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 проблем и новых технологий Казахского национального агроуниверситета, г. Алматы, Республика Казахстан

Даврон Рустамович Норчаев

доктор технических наук, старший научный сотрудник, руководитель лаборатории «Механизации садоводства и овощеводства» Научно-исследовательского института механизации сельского хозяйства Республики 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 Института 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 16.03.2026.

The format is 60 x 90/8. The volume is 11.25 print's sheets. The circulation is 500 copies.

Printed by FSBSI FSAC VIM.



ТЕХНИКА ДЛЯ ЖИВОТНОВОДСТВА

- Измайлов А.Ю., Кирсанов В.В., Кирсанов С.В.**
Разработка энергосберегающего магнитного привода для левитирующей доильной платформы карусельного типа 4

ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ. ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ

- Кондратьева Н.П., Батурина К.А., Большин Р.Г., Пантелеева Л.А.**
Энергосберегающая технология облучения растений с использованием цифровых инженерных решений ... 11

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ

- Московский М.Н., Чулков А.С., Башлыков Я.С.**
Робот для подачи семян в селекционную сеялку 19

- Чаплыгин М.Е., Дмитриев К.С., Овчаренко А.С.**
Определение допустимых значений параметров рабочих органов селекционного зерноуборочного комбайна 25

- Славкина В.Э., Денисов В.А.**
Технологические особенности создания отечественного аналога распылителя сельскохозяйственного опрыскивателя 31

- Годжаев З.А., Васильев С.А., Мишин С.А., Максимов Е.А., Филиппов В.П.**
Оптимизация поворота при реверсивном движении автоматизированного машинно-тракторного агрегата .. 37

- Байбобоев Н.Г., Гаджиев П.И., Рамазанова Г.Г., Бахадиров Г.А., Умирзиков Ж.У.**
Определение динамических нагрузок машин для подготовки почвы под посадку картофеля 45

- Пархоменко Г.Г., Камбулов С.И., Бужинский Н.В.**
Обоснование целесообразности и параметров противэрозионного элемента рабочего органа глубокорыхлителя 52

- Ахалая Б.Х., Ценч Ю.С.**
Комбинированный почвообрабатывающий агрегат с универсальными рабочими органами 58

РАЗВИТИЕ НАУКИ И ТЕХНИКИ

- Ценч Ю.С., Сидоров И.В.**
Технические средства и технологии обработки почвы и внесения минеральных удобрений 64

- Ерохин М.Н., Скороходов Д.М., Павлов А.С.**
Развитие техники и рабочих органов для приготовления кормов в животноводстве 72

- Мударисов С.Г., Неговора А.В., Фаюршин А.Ф.**
История становления и развития научных школ по механизации сельского хозяйства Башкирского государственного аграрного университета 81

EQUIPMENT FOR ANIMAL HUSBANDRY

- Izmailov A.Yu., Kirsanov V.V., Kirsanov S.V.**
Development of an energy-efficient magnetic drive for a levitating carousel-type milking platform 4

DIGITAL TECHNOLOGIES. ARTIFICIAL INTELLIGENCE

- Kondrateva N.P., Baturina K.A., Bolshin R.G., Panteleeva L.A.**
Energy-efficient plant irradiation technology based on digital engineering solutions 11

INNOVATIVE TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT

- Moskovskiy M.N., Chulkov A.S., Bashlykov Ya.S.**
Seed feeding robot for selection seed drill 19

- Chaplygin M.E., Dmitriev K.S., Ovcharenko A.S.**
Determination of permissible operating parameters for the working units of a breeding plot harvester 25

- Slavkina V.E., Denisov V.A.**
Technology for developing a domestic agricultural sprayer nozzle 31

- Godzhaev Z.A., Vasiliev S.A., Mishin S.A., Maximov E.A., Filippov V.P.**
Optimization of turning maneuvers in reversible motion of an automated agricultural machine-tractor unit (MTA) .. 37

- Bayboboev N.G., Gadzhiev P.I., Ramazanova G.G., Bahadirov G.A., Umirzokov J.U.**
Determination of dynamic loads on soil-preparation machines used for potato planting 45

- Parkhomenko G.G., Kambulov S.I., Buzhinsky N.V.**
Justification of the expediency and parameters of the anti-erosion element in the working tool of the deep soil loosener 52

- Akhalaya B.Kh., Tsench Yu.S.**
Combined tillage unit with universal working tools 58

DEVELOPMENT OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

- Tsench Yu.S., Sidorov I.V.**
Machinery and technologies for soil tillage and mineral fertilizer application 64

- Erokhin M.N., Skorokhodov D.M., Pavlov A.S.**
Evolution of machinery and working units for feed preparation in livestock production 72

- Mudarisov S.G., Negovora A.V., Fayurshin A.F.**
Historical analysis of the establishment and development of scientific schools in agricultural mechanization at Bashkir State Agrarian University 81

EDN: STMEGL

DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-1-4-10



Научная статья

УДК 637.115:637.11



Разработка энергосберегающего магнитного привода для левитирующей доильной платформы карусельного типа

Андрей Юрьевич Измаилов,
доктор технических наук, профессор,
академик Российской академии наук,
e-mail: vim@vim.ru;

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

Сергей Владимирович Кирсанов,
аспирант,
e-mail: kirseryii@mail.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Показали целесообразность использования на крупных животноводческих фермах и комплексах России роторно-конвейерных доильных установок карусельного типа. Для вращения платформ используются мотор-редукторы с приводными полиуретановыми колесами, взаимодействующими посредством фрикционного контакта с металлическими профилями, изогнутыми по дуге окружности платформы. Для исключения приводных и опорных колес движителей системы рельс-колесо и связанных с этим трудовых и денежных затрат по их замене в результате износа рассмотрели возможность использования технологии магнитного подвеса и разработки энергосберегающего магнитного привода. (*Цель исследования*) Создание левитирующей модели доильной платформы карусельного типа. (*Материалы и методы*) За основу предложили взять ранее разработанную технологическую схему с использованием аксиально намагниченных постоянных магнитов прямоугольной формы. Рассмотрели технологическую схему привода для платформы на 36 доильных мест с использованием цилиндрической магнитной передачи с внешним зацеплением, получили основное уравнение динамики ее вращательного движения. (*Результаты и обсуждение*) Исходя из динамического расчета вращающейся платформы, определили момент инерции вращающейся платформы с животными, окружное усилие, вращающие моменты на ведущем и ведомом колесах, их угловые скорости, зависимость углового ускорения платформы от времени ее разгона. (*Выводы*) Обоснованы топологические (установочные воздушные зазоры и шаги расположения магнитов на ведущем и ведомом колесах платформы) и кинематические параметры (углы зацепления, радиусы ведущего и ведомого колеса) цилиндрической магнитной передачи. Проведен магнитостатический расчет с определением нормальной и тангенциальной составляющих сил магнитного взаимодействия, разработан алгоритм расчета цилиндрической магнитной передачи с определением параметров магнитного поля и размеров постоянных магнитов для привода левитирующей доильной платформы типа «Карусель».

Ключевые слова: доильная платформа типа «Карусель», магнитная левитация, магнитный привод, цилиндрическая передача, воздушный зазор, угол зацепления, вращающий момент, нормальная и тангенциальная силы.

■ **Для цитирования:** Измаилов А.Ю., Кирсанов В.В., Кирсанов С.В. Разработка энергосберегающего магнитного привода для левитирующей доильной платформы карусельного типа // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2026. Т. 20. №1. С. 4-10. DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-1-4-10. EDN: STMEGL.

Scientific article

Development of an Energy-Efficient Magnetic Drive for a Levitating Carousel-Type Milking Platform

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

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

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

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. The paper demonstrates the feasibility of using rotary conveyor-type carousel milking installations at large livestock farms and complexes in Russia with 1,000 or more head of cattle. In conventional designs, platform rotation is provided by geared motors equipped with polyurethane drive wheels that transmit torque through frictional contact with metal profiles curved along the platform circumference. To eliminate the drive and support wheels of the rail-wheel propulsion system as well as the associated labor and financial costs resulting from wear-related replacement, the paper considers the potential application of magnetic levitation technology and the development of an energy-efficient magnetic drive. (*Research purpose*) To develop a model of a levitating carousel-type milking platform. (*Materials and methods*) The proposed approach is based on a previously developed technological scheme using axially magnetized rectangular permanent magnets. The study considers a drive system for a 36-stall milking platform employing a cylindrical magnetic transmission with external meshing and derives the fundamental equation describing the rotational dynamics of the system. (*Results and discussion*) Based on the dynamic analysis of the rotating platform, the study determined the moment of inertia of the platform with animals, the circumferential force, the torques acting on the driving and driven wheels, their angular velocities, and the relationship between the platform's angular acceleration and the acceleration time. (*Conclusions*) The study substantiates the topological parameters of the cylindrical magnetic transmission, including the installation air gaps and the spacing of magnets on the driving and driven wheels of the platform, as well as the kinematic parameters of the system, namely the meshing angles and radii of the driving and driven wheels. A magnetostatic analysis determined the normal and tangential components of the magnetic interaction forces. In addition, the study developed an algorithm for calculating the cylindrical magnetic transmission, enabling the determination of magnetic field parameters and the dimensions of the permanent magnets for the drive system of a levitating carousel-type milking platform.

Keywords: carousel-type milking platform; magnetic levitation; magnetic drive; cylindrical magnetic transmission; air gap; meshing angle; torque; normal and tangential forces.

■ **For citation:** Izmailov A.Yu., Kirsanov V.V., Kirsanov S.V. Development of an energy-efficient magnetic drive for a levitating carousel-type milking platform. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2026. Vol. 20. N1. 4-10 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-1-4-10. EDN: STMEGL.

На крупных животноводческих фермах России (1000 голов и более) преимущественное распространение получили роторно-конвейерные доильные установки «Карусель» различной вместимости [1]. Для вращения доильных платформ в них используют мотор-редукторы с приводными колесами [2], обеспечивающими фрикционный контакт с подвижным рельсом, изогнутым по дуге окружности платформы, или с окантованной изогнутой полосой, расположенной по торцу платформы. Приводные колеса выполняются в основном из полиуретана. Количество приводных станций (1-3 шт.) зависит от числа доильных мест на платформе [3].

Существует также способ блочно-модульной компоновки оборудования [4] с размещением приводной станции под отдельными сегментами, жестко соединенными между собой и залитыми бетоном с образованием монолитной вращающейся кольцевой платформы [5]. В этом случае повышается точность сборки и отсутствует необходимость в применении изогнутых рельсовых направляющих, которые могут деформироваться в процессе перевозки, монтажа и эксплуатации.

Для снижения износа опорных роликов показана перспективность применения вращающейся левитирующей доильной платформы карусельного типа на постоянных магнитах [6]. Для такой платформы возможно несколько вариантов привода:

- использование традиционных фрикционных колесных электроприводов, установленных сбоку

или под платформой в соответствии с известными техническими решениями;

- применение вертикально расположенных электроприводов с магнитными колесами, взаимодействующими с боковыми подвижными магнитами платформы;

- использование линейного тягового электродвигателя, ротор которого установлен на подвижной части вращающейся платформы, а статор на соответствующей путевой дорожке в виде постоянных магнитов.

Цель исследования: разработка энергосберегающего магнитного привода для левитирующей вращающейся доильной платформы карусельного типа.

Материалы и методы. Принимаем за основное исполнение технологическую схему левитирующей доильной платформы, предложенную в работе [6]. Рассмотрим вариант привода в виде цилиндрической магнитной передачи (*рис. 1*) в соответствии с рекомендациями [7].

На ведущем колесе 1, приводимом во вращение мотор-редуктором 8 через вал 9, расположены с чередованием полюсов постоянные магниты 7, взаимодействующие с противоположными полюсами постоянных магнитов 6, которые установлены на ведомом колесе 2 с подвижными и неподвижными магнитами левитации 3 и 5, представляющем собой подвижную часть доильной платформы. Внизу находится неподвижное основание 4.

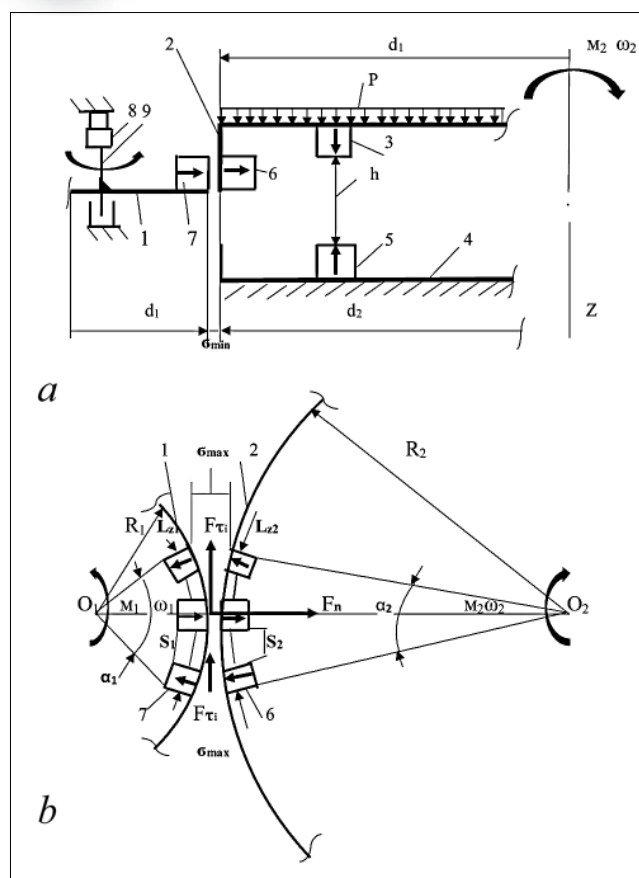


Рис. 1. Схема магнитного подвеса и привода левитирующей платформы карусельного типа на основе цилиндрической магнитной передачи с внешним зацеплением: а – вид сбоку; б – вид сверху без магнитов левитации
 Fig. 1. Scheme of the magnetic suspension and drive system of a levitating carousel-type milking platform based on a cylindrical magnetic gear with external meshing: a – side view; b – top view without levitation magnets

Условные обозначения: h – воздушный левитационный зазор, м; P – распределенная нагрузка (животные), Н; σ – боковой воздушный зазор (σ_{\min} , σ_{\max}), м; d_1, R_1 и d_2, R_2 – диаметры и радиусы ведущего и ведомого колеса, м; F_n и F_τ – нормальная и тангенциальная силы взаимодействия магнитов, Н; M_1, ω_1 и M_2, ω_2 – моменты (Н·м) и угловые скорости вращения $\omega_{1,2}$ (c^{-1}) ведущего и ведомого колеса; S_1 и S_2 – шаг установки магнитов на ведущем и ведомом колесе, м; L_{z1} и L_{z2} – дуги зацепления магнитов на ведущем и ведомом колесе; α_1 и α_2 – углы зацепления ведущего и ведомого колеса.

Нормальная сила притяжения между магнитами F_n будет максимальной при минимальной зазоре между магнитами σ_{\min} в зоне максимального сближения магнитов. По мере их удаления друг от друга сила взаимодействия будет ослабевать. Нормальная сила притяжения F_n вызывает соответствующую тангенциальную силу F_τ (аналог силы трения), которая приводит во вращение ведомое колесо 2, создавая крутящий момент M_2 .

Основное уравнение динамики вращательного движения для доильной платформы можно записать в соответствии с [8, 9]:

$$n[m_{\text{пл1}}(R_{2\text{н}}^2 + R_{2\text{в}}^2) + 2m_{\text{к}}R_{\text{ж}}^2] \cdot d\omega/dt = M_2, \quad (1)$$

где n – число мест доения на доильной платформе; $m_{\text{пл1}}$ – масса платформы в расчете на одно доильное место, кг; $R_{2\text{н}}$ и $R_{2\text{в}}$ – наружный и внутренний (на рис. 1 не показан) радиусы кольцевой доильной платформы, м; $m_{\text{к}}$ – масса коровы, кг; $R_{\text{ж}}$ – радиус расположения центра тяжести животного на платформе, м; $d\omega/dt$ – угловое ускорение платформы, рад/с²; M_2 – вращающий момент, Н·м.

Моментом сопротивления можно пренебречь из-за фактического отсутствия сил трения вследствие магнитного подвеса платформы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Задавая время разгона (t , с) и зная конечную частоту вращения платформы ($n_{\text{об}} = 0,09 \text{ мин}^{-1}$ или $5-6 \text{ ч}^{-1}$) [10], можно рассчитать угловую скорость (ω , рад/с), ускорение (ε_2 , рад/с²) (табл. 1) и потребный вращающий момент, а далее уже определить все необходимые параметры магнитной передачи.

Исходные данные для расчета: $m_{\text{пл1}} = 580$ кг; $m_{\text{к}} = 580$ кг; наружный диаметр платформы равен 12 м; внутренний диаметр платформы равен 8,4 м; $n = 36$; радиус расположения центра тяжести животного $R_{\text{ж}}$ примерно равен среднему радиусу платформы $(6 + 4,2) : 2 \approx 5,1$ м.

Подставляя эти данные и упрощая выражение (1), получим эмпирическую зависимость:

$$1103090 \cdot \varepsilon_2 = M_2. \quad (2)$$

По величине M_2 можно определить необходимую тангенциальную силу F_τ и крутящий момент M_1 на ведущем колесе:

$$\begin{cases} F_\tau = 1103090 \cdot \varepsilon_2 \\ M_1 = F_\tau \cdot R_1 = 1103090 \cdot \varepsilon_2 R_1. \end{cases} \quad (3)$$

Таблица										Table									
ЗАВИСИМОСТЬ УГЛОВОГО УСКОРЕНИЯ ДОИЛЬНОЙ ПЛАТФОРМЫ ε_2 ОТ ВРЕМЕНИ РАЗГОНА Δt																			
DEPENDENCE OF THE MILKING PLATFORM ANGULAR ACCELERATION ε_2 ON THE ACCELERATION TIME Δt																			
Показатель	Значение																		
$\Delta\omega$, рад/с	0,0094	0,0094	0,0094	0,0094	0,0094	0,0094	0,0094	0,0094	0,0094	0,0094	0,0094	0,0094	0,0094	0,0094	0,0094	0,0094	0,0094	0,0094	0,0094
Δt , с	1	2	4	6	8	10	12	14	16	1	2	4	6	8	10	12	14	16	
ε_2 , рад/с ²	0,0094	0,0047	0,0023	0,0015	0,0012	0,0009	0,0008	0,0007	0,0006	0,0094	0,0047	0,0023	0,0015	0,0012	0,0009	0,0008	0,0007	0,0006	

В выражении (3) неизвестной величиной является параметр R_1 , который следует определить по размерам постоянных магнитов и установочных зазоров между ними, определив тем самым длину дуги зацепления, последующую длину окружности ведущего колеса и его радиус.

Выразим значение длины окружностей ведущего и ведомого колеса через размеры магнитов и установочные зазоры между ними. В качестве допущения принимаем использование одинаковых магнитов кубической формы со стороной l_M на обоих колесах передачи и равенство установочных зазоров между ними ($s_1 = s_2 = s$).

При допущении одинакового шага установки магнитов на обоих колесах ($s_1 = s_2 = s$) количество магнитов на соответствующих дугах зацепления будет тоже одинаковым ($\kappa_{M1} = \kappa_{M2} = \kappa_M$). С небольшим допущением можно принять равенство соответствующих дуг зацепления:

$$L_{z1} = L_{z2} = L_z = \kappa_M \cdot l_M + s (\kappa_M - 1). \quad (4)$$

Выражая значение соответствующих дуг зацепления через центральные углы, с учетом (4) получим:

$$\begin{aligned} 2\pi R_1 \cdot \alpha_1 / 360 &= 2\pi R_2 \cdot \alpha_2 / 360 = \\ &= \kappa_M \cdot l_M + s (\kappa_M - 1). \end{aligned} \quad (5)$$

Откуда можно определить соответствующие углы зацепления:

$$\begin{cases} \alpha_2 = \frac{180 \cdot [\kappa_M \cdot l_M + s (\kappa_M - 1)]}{\pi \cdot R_2} \\ \alpha_1 = \frac{180 \cdot [\kappa_M \cdot l_M + s (\kappa_M - 1)]}{\pi \cdot R_2} \cdot i \end{cases} \quad (6)$$

В системе уравнений (6) две неизвестных величины α_1 и R_1 (входит в параметр i – передаточное отношение). Для их определения рассмотрим фрагмент дуги зацепления (рис. 2).

Прямоугольные треугольники O_1AB и O_2AB образованы пересечением радиус-векторов R_1 и R_2 с образованием общей стороны AB , перпендикулярной линии O_1O_2 , соединяющей центры вращения ведомого и ведущего колес.

Из прямоугольного треугольника O_2AB находим катет AB и длину гипотенузы O_2A :

$$\begin{aligned} AB &= (R_2 + \sigma_{min}) \cdot \operatorname{tg} \alpha_2 / 2 \\ O_2A &= (R_2 + \sigma_{min}) / \cos \alpha_2 / 2. \end{aligned} \quad (7)$$

Длину гипотенузы AC и катетов треугольника ACA' найдем из выражений:

$$\begin{aligned} AC &= O_2A - R_2 \\ AA' &= AC \cdot \sin \alpha_2 / 2 \\ A'C &= AC \cdot \cos \alpha_2 / 2. \end{aligned} \quad (8)$$

Из треугольника DAC определяем катет $A'D$ и $\operatorname{tg} \alpha_2 / 2$ с учетом значений AC и $A'C$ из формул (8) и O_2A из (7)

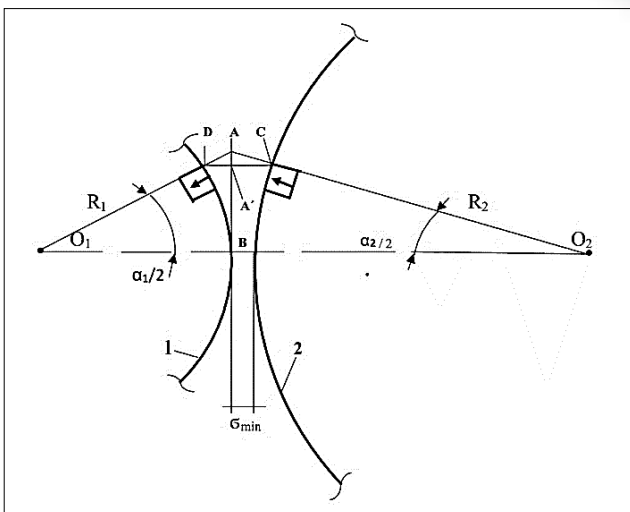


Рис. 2. Фрагмент дуги зацепления цилиндрической магнитной передачи: 1 – ведущее колесо; 2 – ведомое колесо (доильная платформа)

Fig. 2. Fragment of the meshing arc of a cylindrical magnetic gear: 1 – driving wheel; 2 – driven wheel (milking platform)

$$\begin{cases} A'D = DC - A'C = \sigma_{max} - A'C \\ \operatorname{tg} \frac{\alpha_1}{2} = \frac{AA'}{A'D} = \frac{\left(\frac{R_2 + \sigma_{min}}{\cos \frac{\alpha_2}{2}} - R_2 \right) \cdot \sin \frac{\alpha_2}{2}}{\sigma_{max} - \left(\frac{R_2 + \sigma_{min}}{\cos \frac{\alpha_2}{2}} - R_2 \right) \cdot \cos \frac{\alpha_2}{2}}. \end{cases} \quad (9)$$

Из треугольника O_1AB с учетом выражений для AB из (7) и $\operatorname{tg} \alpha_2 / 2$ из (9) запишем окончательно значение для R_1 :

$$R_1 = \frac{[(R_2 + \sigma_{min}) \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha_2}{2}] \cdot \left[\sigma_{max} - \left(\frac{R_2 + \sigma_{min}}{\cos \frac{\alpha_2}{2}} - R_2 \right) \cdot \cos \frac{\alpha_2}{2} \right]}{\left(\frac{R_2 + \sigma_{min}}{\cos \frac{\alpha_2}{2}} - R_2 \right) \cdot \sin \frac{\alpha_2}{2}}. \quad (10)$$

Суммарную нормальную силу взаимодействия магнитов $F^{\Sigma n}$ по дуге зацепления L_z можно приближенно оценить по формуле [11], умножив поверхность одного магнита на их число κ_M в дуге зацепления:

$$F^{\Sigma n} = \frac{B^2 \cdot \kappa_M \cdot l_M^2}{2\mu_0}, \quad (11)$$

где l_M – площадь поверхности одного магнита кубической формы, m^2 ; μ_0 – магнитная постоянная, $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; B – магнитная индукция в зазоре, Тл.

Магнитную индукцию в зазоре σ можно определить в соответствии с рекомендациями [11], полагая, что боковой воздушный зазор изменяется в диапазоне от σ_{min} до σ_{max} . Принимаем его действующее значение по дуге зацепления, как среднее арифметическое:

$$\sigma_{cp} = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}.$$

С учетом значения μ_0 и проводя некоторые упрощения получим:

$$F^{\Sigma_n} = \frac{4 \frac{B^2 r}{\pi^2} \left[\tan - 1 \left(\frac{\frac{\sigma_{cp}}{2} + l_M}{\frac{l_M}{2} \cdot \frac{l_M}{2}} \sqrt{\left(\frac{l_M}{2}\right)^2 + \left(\frac{l_M}{2}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{cp}}{2} + l_M\right)^2} \right)}{8\pi \cdot 10^{-7}} \right] - \tan - 1 \left(\frac{\frac{\sigma_{cp}}{2}}{\frac{l_M}{2} \cdot \frac{l_M}{2}} \sqrt{\left(\frac{l_M}{2}\right)^2 + \left(\frac{l_M}{2}\right)^2 + \frac{\sigma_{cp}^2}{4}} \right)^2 \cdot \kappa_M \cdot l_M^2}{8\pi \cdot 10^{-7}} \quad (12)$$

где Br – остаточная магнитная индукция неодимовых постоянных магнитов (приблизительно равна 1,48 Тл).

Чтобы найти искомую суммарную касательную силу F_τ , создающую вращающий момент по дуге зацепления, воспользуемся соотношением:

$$F^{\Sigma_\tau} = F^{\Sigma_n} \cdot \kappa_\tau, \quad (13)$$

где κ_τ – коэффициент, учитывающий соотношение касательных и нормальных сил (аналог коэффициента трения), определяется экспериментально.

По некоторым оценкам он может варьировать от 0,2 до 0,6 в зависимости от зазоров между магнитами. Более точно его значение, как и значения параметров индукции магнитного поля взаимодействующих магнитов, можно определить с помощью численных методов и программных продуктов в среде *Ansys Maxwell* [12]. Принимая во внимание возможное среднее значение коэффициента $\kappa_\tau = 0,4$ и проводя некоторые упрощения, получим окончательное выражение для суммарной касательной силы, действующей вдоль дуги зацепления магнитов:

$$F^{\Sigma_\tau} = \frac{1,6 \frac{B^2 r}{\pi^2} \left[\tan - 1 \left(\frac{\frac{\sigma_{cp}}{2} + l_M}{\frac{l_M}{2} \cdot \frac{l_M}{2}} \sqrt{\left(\frac{l_M}{2}\right)^2 + \left(\frac{l_M}{2}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{cp}}{2} + l_M\right)^2} \right)}{8\pi \cdot 10^{-7}} \right] - \tan - 1 \left(\frac{\frac{\sigma_{cp}}{2}}{\frac{l_M}{2} \cdot \frac{l_M}{2}} \sqrt{\left(\frac{l_M}{2}\right)^2 + \left(\frac{l_M}{2}\right)^2 + \frac{\sigma_{cp}^2}{4}} \right)^2 \cdot \kappa_M \cdot l_M^2}{8\pi \cdot 10^{-7}} \quad (14)$$

Учитывая ранее полученное значение из выражения (3) и приравняв правые части выражений (3) и (14), окончательно запишем:

$$\frac{1,6 \frac{B^2 r}{\pi^2} \left[\tan - 1 \left(\frac{\frac{\sigma_{cp}}{2} + l_M}{\frac{l_M}{2} \cdot \frac{l_M}{2}} \sqrt{\left(\frac{l_M}{2}\right)^2 + \left(\frac{l_M}{2}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{cp}}{2} + l_M\right)^2} \right)}{8\pi \cdot 10^{-7}} \right] - \tan - 1 \left(\frac{\frac{\sigma_{cp}}{2}}{\frac{l_M}{2} \cdot \frac{l_M}{2}} \sqrt{\left(\frac{l_M}{2}\right)^2 + \left(\frac{l_M}{2}\right)^2 + \frac{\sigma_{cp}^2}{4}} \right)^2 \cdot \kappa_M \cdot l_M^2}{8\pi \cdot 10^{-7}} = \frac{1}{R_2} \cdot 1103090 \cdot \varepsilon_2. \quad (15)$$

Решение данного уравнения в силу возможной одновременной вариативности нескольких параметров передачи наиболее целесообразно с применением численных методов по следующему алгоритму.

1. Задаем значениями угловых ускорений ε_2 из таблицы, предположительно $\varepsilon_2 = 0,0015 - 0,0023$ рад/с², и радиус платформы, в нашем случае $R_2 = 6$ м.

2. Выбираем размеры неодимовых магнитов кубической формы, например $0,01 \times 0,01 \times 0,01$ м; $0,015 \times 0,015 \times 0,015$ м; $0,02 \times 0,02 \times 0,02$ м и т.д., остаточная магнитная индукция $Br \approx 1,48$ Тл.

3. Задаем величину бокового воздушного зазора $\sigma_{cp} \approx 0,006$ м ($\sigma_{min} = 0,003$ м, $\sigma_{max} = 0,009$ м) между колесами и шаг установки магнитов на каждом колесе $s = 0,002 - 0,004$ м.

4. Подставляем данные значения (по п. 1-3) в уравнение (15), решаем его относительно κ_M и находим искомое число магнитов по дуге зацепления на каждом колесе.

5. Определяем угол зацепления α_2 на ведомом колесе по формуле (6).

6. Определяем соответствующий угол зацепления α_2 и радиус ведущего колеса по формулам (6) и (10).

7. Определяем значение суммарной касательной силы по дуге зацепления F_τ^{Σ} по формуле (14) и сравниваем его со значением, вычисленным по выражению системы (3) по условию:

$$F^{\Sigma_\tau(30)} \geq F^{\Sigma_\tau(8)}.$$

Если условие выполняется, то переходим к п. 8, если не выполняется, то повторяем расчет (с п. 2) для других размеров магнитов и установочных зазоров.

8. Определяем крутящий момент M_1 на ведущем колесе по формуле из системы (3).

9. Вычисляем передаточное отношение:

$$i = R_2 / R_1.$$

10. Определяем угловую скорость ведущего колеса из выражения:

$$\omega_1 = i \cdot \omega_2$$

и соответствующую мощность привода:

$$N_{пр} = M_1 \cdot \omega_1 \cdot \kappa_3,$$

где κ_3 – коэффициент запаса, равен 1,15-1,20.

11. По параметрам п. 10 подбираем соответствующий мотор-редуктор.

Выводы. На основании проведенного анализа предложена технологическая схема привода левирующей доильной платформы карусель с использованием цилиндрической магнитной передачи с внешним зацеплением.

Проведен динамический расчет вращающейся платформы для доильной карусели на 36 мест, определены: окружное усилие, угловые скорости, крутящие моменты, получена зависимость углового ускорения доильной платформы ε_2 от времени ее разгона.

Обоснованы топологические (установочные зазоры, шаг магнитов) и кинематические параметры (углы зацепления, радиусы ведущего и ведомого колес) цилиндрической магнитной передачи, проведён её магнитостатический расчёт с определени-

ем нормальной и окружной касательной сил, разработан алгоритм расчёта передачи с определением параметров магнитного поля и размеров постоянных магнитов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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.
2. Кирсанов В.В., Кравченко В.Н. Пути совершенствования оборудования для доения и первичной обработки молока // *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 2005. №9. С. 41-48. EDN: HZBEDT.
3. Вторый В.Ф., Вторый С.В. Развитие механизации молочного скотоводства в России и Советском Союзе в первой половине XX века // *Аграрная наука Северо-Востока*. 2024. N25(2). С. 301-310. DOI: 10.30766/2072-9081.2024.25.2.301-310.
4. 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. №2. С. 4-12. DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-2-4-12.
5. Лобачевский Я.П., Лачуга Ю.Ф., Измайлов А.Ю., Шогенов Ю.Х. Научно-технические достижения агроинженерной науки в условиях цифровизации сельского хозяйства // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2025. №3. С. 45-53. DOI: 10.31857/S2500262725030081.
6. 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: 10.31857/S2500262725020106.
7. Молоканов О.Н., Рыжов В.В., Конюшенко Е.В. и др. Анализ материалоемкости ветроагрегата на основе дифференциальной магнитной передачи // *Электротехника*. 2023. №1. С. 2-9. DOI: 10.53891/00135860_2023_01_2.
8. Приходько А.А., Коптева А.А. Моделирование динамики планетарного перемешивающего устройства с неравномерным вращательным движением рабочего органа // *Математическое моделирование и численные методы*. 2020. №1(25). С. 88-102. DOI: 10.18698/2309-3684-2020-1-88102.
9. Дерюгин Е.Е. Упрощенный расчёт момента инерции поперечного сечения консоли под нагрузкой. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2024. N24(2). С. 159-169. DOI: 10.23947/2687-1653-2024-24-2-159-169.
10. Иванов Ю.Г., Михляев А.К. Технологическая оценка автоматизированной и роботизированной доильных установок типа «карусель» // *Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт*. 2025. №12. С. 24-31. DOI: 10.33920/sel-10-2512-04.
11. 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. №2. С. 226-231. DOI: 10.7868/S0367676518020187.
12. 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.

REFERENCES

1. 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
2. Kirsanov V.V., Kravchenko V.N. Ways of improving the equipment for milking and primary processing of milk. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2005. №9. 41-48 (In Russian). EDN: HZBEDT.
3. Vtoryi V.F., Vtoryi S.V. Development of mechanization of dairy cattle in Russia and the Soviet Union in the first half of the twentieth century. *Agrarian Science Euro-North-East*. 2024. N25(2). 301-310 (In Russian). DOI: 10.30766/2072-9081.2024.25.2.301-310.
4. 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. №2. 4-12 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-2-4-12.
5. Lobachevsky Ya.P., Lachuga Yu.F., Izmailov A.Yu., Shogenov Yu.Kh. Scientific and technical achievements of agroengineering science in the conditions of digitalization of agriculture. *Russian Agricultural Science*. 2025. №3. 45-53 (In Russian). DOI: 10.31857/S2500262725030081.
6. Lobachevsky Ya.P., Fedorenko V.F., Kirsanov V.V. et al. Simulation of the interaction of magnetic assemblies of the «Karusel» levitating milking platform. *Russian Agricultural Science*. 2025. №2. 54-58 (In Russian). DOI: 10.31857/S2500262725020106.

7. Molokanov O.N., Ryzhov V.V., Konyushenko E.V. et al. Cost evaluation of wind turbine generator system with magnetic continuously variable transmission. *Electrical Engineering*. 2023. N1. 2-9 (In Russian). DOI: 10.53891/00135860_2023_01_2.
8. Prikhodko A.A., Kopteva A.A. Modeling the dynamics of a planetary stirred tank with irregular rotational motion of the impeller. *Mathematical Modeling and Numerical Methods*. 2020. N1(25). 88-102 (In Russian). DOI: 10.18698/2309-368.
9. Deryugin E.E. Simplified calculation of the inertia moment of the cross section of the console under loading. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2024. N24(2). 159-169 (In Russian). DOI: 10.23947/2687-1653-2024-24-2-159-169.
10. Ivanov Yu.G., Mikhlyayev A.K. Technological evaluation of automated and robotic Carousel-type milking units. *Agricultural Machinery: Service and Repair*. 2025. N12. 24-31 (In Russian). DOI: 10.33920/sel-10-2512-04.
11. Ginzburg B.A., Kaminskaya T.P., Polyakov P.A., Popov V.V. 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.
12. Vavilov V.E., Ismagilov F.R., Zherebtsov A.A. et al. Investigation of magnetic fields at new construction of a homopolar magnetic bearing. *Aerospace Instrument-making*. 2023. N8. 50-61 (In Russian). DOI: 10.25791/aviakosmos.8.2023.1357.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Измайлов А.Ю. – постановка цели и задач исследований, формулирование основной концепции статьи, написание введения и реферата;

Кирсанов В.В. – написание методической части, части раздела «Результаты и обсуждение» и выводов;

Кирсанов С.В. – подготовка графических и табличных материалов, участие в написании раздела «Результаты и обсуждение», подбор и анализ литературы.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Izmailov A.Yu. – formulation of the research aims and objectives, development of the main concept of the article, writing of the Introduction and Abstract;

Kirsanov V.V. – preparation of the methodology section, contribution to the Results and discussion section and the Conclusions;

Kirsanov S.V. – preparation of graphical and tabular materials, contribution to the Results and discussion section, literature selection and 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

01.12.2025
27.02.2026

EDN: YVNHUE

DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-1-11-18

Научная статья
УДК 631.344.5:628.94-529

Энергосберегающая технология облучения растений с использованием цифровых инженерных решений

Надежда Петровна Кондратьева¹,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: aep_isha@mail.ru;
Кристина Андреевна Батурина¹,
старший преподаватель,
e-mail: kristiriska@mail.ru;

Роман Геннадьевич Большин²,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: bolshin.r@yandex.ru;
Лариса Анатольевна Пантелеева¹,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: panlar@bk.ru

¹Удмуртский государственный аграрный университет, г. Ижевск, Российская Федерация;

²МИРЭА-Российский технологический университет, Москва, Российская Федерация

Реферат. Отметим, что при выращивании сельскохозяйственных культур в защищенном грунте затраты на электроэнергию составляют около 20 процентов себестоимости продукции растениеводства. Определению эффективного спектра излучения для конкретных культур посвящены многие исследования. Вместе с тем, учитывая световую и темновую стадии фотосинтеза, можно предложить энергосберегающий импульсный режим облучения, сохраняющий продуктивность растений и не уменьшающий срок службы светодиодных облучательных установок (*LED OY*). (*Цель исследования*) Разработать цифровые инженерно-технические решения для реализации энергосберегающей технологии облучения растений *RGB* светодиодными облучательными установками. (*Материалы и методы*) Разработана автоматизированная цифровая система управления *RGB LED* светодиодных облучателей. Длительность светового импульса и темнового периода в режиме реального времени задается по беспроводной связи *Bluetooth* с подключением к микроконтроллеру модуля *Bluetooth HC-05* и управляется через мобильное приложение *Bluetooth Electronics*. Используется язык программирования *C++*. (*Результаты и обсуждение*) Эксперименты показали, что самое быстрое развитие растений наблюдалось в режиме длительности импульса света 1 секунда и паузы 0,5 секунды. Эффект подтверждается разницей по сравнению с контролем (100 процентов) площади листьев в конце и в начале эксперимента (приблизительно 108 процентов). Потребленная электроэнергия при работе *RGB LED* светодиодных облучателей по 16 часов в энергосберегающем режиме составит около 78 процентов от контрольного значения, принятого за 100 процентов. (*Выводы*) Разработанные цифровые инженерно-технические решения для реализации энергосберегающей технологии облучения растений в *RGB LED* установках позволяют экономить электроэнергию при сохранении продуктивности растений.

Ключевые слова: выращивание растений, защищенный грунт, облучение растений, светодиодные установки *RGB LED*, энергосбережение, цифровые технологии, беспроводная связь *Bluetooth*, автоматизированные системы управления, микроконтроллер.

■ **Для цитирования:** Кондратьева Н.П., Батурина К.А., Большин Р.Г., Пантелеева Л.А. Энергосберегающая технология облучения растений с использованием цифровых инженерных решений // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2026. N20. С. 11-18. DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-1-11-18. EDN: YVNHUE.

Scientific article

Energy-Efficient Plant Irradiation Technology Based on Digital Engineering Solutions

Nadezhda P. Kondrateva¹,
Dr.Sc.(Eng), professor,
e-mail: aep_isha@mail.ru;
Kristina A. Baturina¹,
senior teacher,
e-mail: kristiriska@mail.ru;

Roman G. Bolshin²,
Ph.D.(Eng), associate professor,
e-mail: bolshin.r@yandex.ru;
Larisa A. Panteleeva¹,
Ph.D.(Eng), associate professor,
e-mail: panlar@bk.ru

¹Udmurt State Agricultural University, Izhevsk, Udmurtia, Russian Federation;

²MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russian Federation

Abstract. The paper highlights that in protected cultivation of agricultural crops, electricity costs account for approximately 20 percent of the total crop production cost. Numerous studies have focused on identifying the optimal light spectrum for specific crops. At the same time, considering the light and dark phases of photosynthesis, it is possible to propose an energy-efficient pulsed irradiation mode that maintains plant productivity without reducing the service life of LED irradiation systems. (*Research purpose*) To develop digital engineering solutions for implementing an energy-saving plant irradiation technology based on RGB LED lighting systems. (*Materials and methods*) An automated digital control system for RGB LED irradiators was developed. The durations of the light pulse and the dark interval were set in real time via *Bluetooth* wireless communication using an *HC-05 Bluetooth* module connected to a microcontroller and controlled through the *Bluetooth Electronics* mobile application. The control algorithm was implemented in C++. (*Results and discussion*) The experimental results demonstrated that the most rapid plant development occurred under a light pulse duration of 1 second with a 0.5-second interval. The effect was confirmed by comparing leaf area growth relative to the control (100 percent) at the beginning and end of the experiment, with values reaching approximately 108 percent. According to calculations, electricity consumption during 16-hour operation of the RGB LED irradiators in energy-saving mode amounted to about 78 percent of the control value (set at 100 percent). (*Conclusions*) The developed digital engineering solutions for RGB LED-based plant irradiation systems enable energy savings while maintaining plant productivity, demonstrating their effectiveness for energy-efficient protected cultivation.

Keywords: plant cultivation, protected ground, plant irradiation, RGB LED lighting systems, energy efficiency, digital technologies, Bluetooth wireless communication, automated control systems, microcontroller.

■ **For citation:** Kondrateva N.P., Baturina K.A., Bolshin R.G., Panteleeva L.A. Energy-efficient plant irradiation technology based on digital engineering solutions. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2026. Vol. 20. N1. 11-18 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-1-11-18. EDN: .YVNHUE.

При выращивании сельскохозяйственных культур в защищенном грунте затраты на электроэнергию составляют до 20% себестоимости готовой продукции. Анализ публикаций в этой области показывает, что во многих научных исследованиях определяли эффективный спектр светового освещения при выращивании конкретной культуры. Например, предложено устройство для искусственного освещения растений с использованием линейки светодиодов с излучением красного и синего спектров [1]. В другом случае применяется селекционный фитотрон, в котором размещены группы светодиодов с различными спектральными диапазонами [2]. В работе [3] предложена методика выбора технологического оборудования для производства рассады овощных культур в интенсивной светокультуре. Также рассматривается применение источников излучения для выращивания растений в домашних условиях [4]. Изучалось влияние спектра LED-облучательной установки с RGB-светодиодами на рост зеленого корма [5] и спектрального состава света на накопление фотосинтетических пигментов и урожайность зерновых культур при выращивании в контролируемых условиях [6]. Проводятся широкие исследования по разработке энергосберегающего освещения и его расчету с учетом спектра излучения оптических источников [7].

Вместе с этим, учитывая световую и темновую стадии фотосинтеза, можно предложить импульсный режим облучения, при котором экономится электроэнергия, но сохраняется продуктивность растений [8-11]. Для реализации такого режима облучения разработана карусельная установка с га-

зоразрядными лампами. Положительные результаты были получены в исследовании [9], но этот энергосберегающий режим не нашел применения на практике ввиду того, что из-за импульсного режима работы разрядных источников света резко сокращался срок их службы.

В настоящее время в растениеводстве широко используются светодиодные облучатели/лампы [12], которые могут работать в импульсном режиме без уменьшения срока службы [13, 14]. Современные цифровые технологии позволяют подобрать эффективное сочетание длительности светового импульса и темновой паузы индивидуально для исследуемой культуры в реальном времени через беспроводные интерфейсы и существенно снизить потребление электроэнергии [15]. Выращивание в культуре *in vitro* выбрано не случайно, так как сейчас перспективным методом получения безвирусного посадочного материала является меристемное размножение растений [16-18]. В лабораториях ФГБУН Удмуртского федерального исследовательского центра УрО РАН выращивают пробирочный картофель, малину, жимолость, виноград, розу и другие культуры.

При выращивании розы в культуре *in vitro* влияние RGB светодиодов, работающих в энергосберегающем (импульсном) режиме, практически не изучено. Разработка цифровых инженерных решений [19, 20] для реализации энергосберегающего режима при выращивании культуры розы *in vitro* под RGB светодиодами, работающими в энергосберегающем (импульсном) режиме облучения, представляет актуальную задачу.

Цель исследования: разработать цифровые инженерно-технические решения для реализации энергосберегающей технологии облучения растений RGB светодиодами облучательными установками.

Для выполнения поставленной цели необходимо:

- разработать автоматизированную цифровую систему управления работой RGB светодиодами установками (RGB LED) для реализации энергосберегающего режима облучения;
- используя разработанные цифровые инженерные устройства провести экспериментальные исследования выращивания розы в культуре *in vitro* и сравнить потребление электроэнергии RGB LED в разных режимах облучения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Для реализации импульсного режима облучения RGB светодиодами облучательными установками (RGB LED OY) разработана программа на языке C++ для микроконтроллера *Atmel 35473D*. Управление и задание параметров импульсного режима (длительность светового и темнового импульсов) в режиме реального времени осуществляли с помощью беспроводной связи *Bluetooth* с подключением к микроконтроллеру модуля *Bluetooth HC-05*. Управление производится через мобильное приложение *Bluetooth Electronics*. В перспективе эту программу предлагается использовать на практике для облучения меристемных растений *in vitro* установками RGB LED в меристемных лабораториях.

Программа позволяет для конкретной культуры *in vitro* подобрать длительность импульсов света и темновой паузы, чтобы таким образом:

- активизировать процессы роста биомассы;
- улучшить укореняемость растений;
- уменьшить сроки готовности растений к пересадке в грунт.

Центральным элементом автоматизированной цифровой системы является управляющий модуль, который координирует работу всех компонентов. В состав системы входят: RGB-модуль, состоящий из LED; регулирующие транзисторы; индикаторный блок для визуального отображения режимов работы и интерфейс *Bluetooth*-связи для взаимодействия с внешними устройствами (рис. 1).

Инициализация системы начинается с калибровки управляющих пинов для RGB-светодиодов. На этом этапе устанавливаются базовые параметры интенсивности излучения, конфигурация режимов работы и верифицируется целостность всех компонентов системы.

Функциональные возможности системы реализуются через три основных модуля: спектральный, отвечающий за управление цветовыми характеристиками; временной, контролирующей длительность воздействия; интенсивный, регулирующий

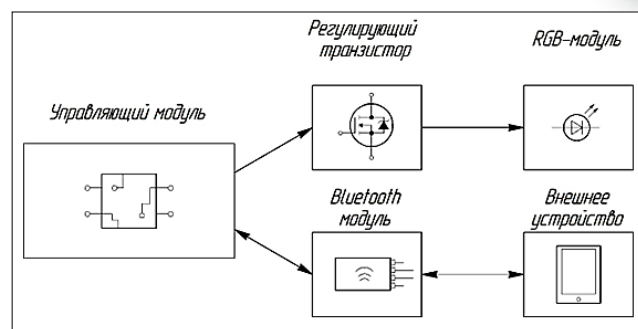


Рис. 1. Схема управления облучательной установкой RGB LED

Fig. 1. Control diagram of the RGB LED irradiation system

яркость излучения (ток LED).

Цифровая автоматизированная система предусматривает три основных режима функционирования установки: непрерывный, характеризующийся постоянной заданной облученностью; импульсный, с периодическим включением и выключением светодиодов; тестовый, предназначенный для проверки работоспособности всех компонентов.

К контролируемым параметрам цифровой системы относятся спектральный состав излучения (соотношение красного *R*, зеленого *G* и синего *B* света), величина облученности/освещенности и временные характеристики (длительность и частота импульсов). Визуальный контроль осуществляется через индикацию текущего режима работы, параметров режима облучения и сигнализацию о нештатных ситуациях.

Интеграционные возможности системы обеспечиваются наличием *Bluetooth*-модуля *HC-05* для удаленного управления, протокола связи для обмена данными и *API*-интерфейса для интеграции с внешними системами (рис. 2).



Рис. 2. Интерфейс управления параметрами установки с телефона

Fig. 2. Interface for controlling the unit parameters from a mobile phone

Включение/отключение программы осуществляется кнопками «Зеленая»/«Красная»; изменение длительности светового импульса и темновой паузы – кнопками «P_M» и «N_M»; изменение продолжительности коротких импульсов и одного длительного импульса – кнопками «P_P» и «N_P»;

увеличение или уменьшение уровня облученности – кнопками «Вверх» или «Вниз»; визуальный контроль регулируемых параметров через индикацию текущего режима работы осуществляется в окне «Параметры».

Меню после нажатия кнопки « P_M » подразделяется на выбор параметров импульса:

- P_P1 – длительность светового импульса (шаг изменения 100 миллисекунд). При использовании кнопок «Вверх»/«Вниз» в окне «Параметры» на дисплее появляются функции « $A_P_I_BF$ »/« $S_P_I_BF$ » (*blink_frequency*);

- P_P2 – длительность темновой паузы (шаг 100 миллисекунд). При использовании кнопок «Вверх»/«Вниз» в окне «Параметры» на дисплее появляются функции: « $A_P_I_BF$ »/« $S_P_I_BF$ » (*blink_frequency*). При этом, на первый взгляд, название одно, но функция регулирования паузы и импульса находится в меню интерфейса в разных вкладках;

- P_P0 – длительность импульсного режима работы установки (шаг 100 миллисекунд). При использовании кнопок «Вверх»/«Вниз» в окне «Параметры» на дисплее появляются функции: « $A_P_0_BL$ »/« $S_P_0_BL$ » (*blink_lenght*).

Меню после нажатия кнопки « N_M » содержит только один параметр:

- N_P0 – продолжительность длинного непрерывного импульса (шаг 100 миллисекунд).

Основной алгоритм работы системы включает последовательность действий: инициализацию компонентов, верификацию параметров, реализацию выбранного режима фотостимуляции, мониторинг состояния и коррекцию параметров при необходимости.

Методология тестирования системы предусматривает также калибровку спектральных характеристик, верификацию временных параметров, проверку стабильности работы и тестирование интерфейсов управления.

Техническая реализация системы базируется на комплексном программно-аппаратном решении, включающем программный код для управления, драйверы устройств для взаимодействия с компонентами, библиотеки функций для реализации алгоритмов. На *рисунке 3* приведен фрагмент кода программы управления.

Таким образом, предложенное цифровое инженерно-техническое решение позволило реализовать непрерывно-импульсный энергосберегающий режим облучения растений.

Из *рисунка 4* видно, что в течение 30 с происходит импульсное облучение растений розы *in vitro*. Поэтому необходимо индивидуально подобрать длительность темновой паузы, так как роза относится к растениям длинного дня и продолжительность светового импульса мы оставили максимальной и равной 1 с.

```

1  4
2  5 class RGB_LED {
3  6     // Элементы, которые будут доступны из вне
4  7 public:
5  8     // Инициализатор объекта
6  9     RGB_LED(int r_pin, int g_pin, int b_pin, bool is_pwm)
7 10     : mode(this) {
8 11         this->r_pin = r_pin;
9 12         this->g_pin = g_pin;
10 13         this->b_pin = b_pin;
11 14         this->is_pwm = is_pwm;
12 15
13 16         pinMode(r_pin, OUTPUT);
14 17         pinMode(g_pin, OUTPUT);
15 18         pinMode(b_pin, OUTPUT);
16 19     }
17 20
18 21 void Power_Set(uint8_t newState = 0) {
19 22     if (newState == 0) {
20 23         this->Power_is_ON = false;
21 24     } else {
22 25         this->Power_is_ON = true;
23 26     }
24 27 }
25 28
26 29 void Light_Set(uint8_t newState = 0) {
27 30     if (Power_is_ON) {
28 31         if (newState == 0) {
29 32             this->light_is_on = false;
30 33             analogWrite(this->r_pin, 0);
31 34             analogWrite(this->g_pin, 0);
32 35             analogWrite(this->b_pin, 0);
33 36         } else {
34 37             this->light_is_on = true;
35 38             analogWrite(this->r_pin, this->r_value);
36 39             analogWrite(this->g_pin, this->g_value);
37 40             analogWrite(this->b_pin, this->b_value);
38 ..

```

Рис. 3. Фрагмент кода управляющей программы
Fig. 3. Fragment of the control program code

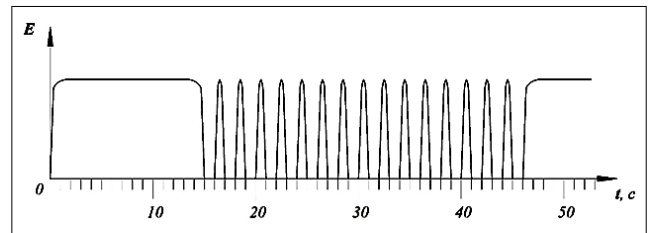


Рис. 4. Структурная схема непрерывно-импульсного энергосберегающего режима облучения растений, состоящего из циклического чередования одного светового импульса длительностью 15 с и с последующей чередой коротких импульсов в течение 30 с

Fig. 4. Block diagram of a continuous–pulse energy-saving plant irradiation mode consisting of cyclic alternation of a single light pulse with a duration of 15 seconds and a subsequent series of short pulses over a 30 seconds period

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Проведено сравнение трех режимов облучения растений одинакового спектрального состава (*табл. 1*):

1-й – контроль RGB LED облучающей установки, работающей в непрерывном (традиционном) режиме ($RGB_{\text{контр}}$);

2-й – импульсный на RGB LED ОУ: время светового импульса и темновой паузы по 1 с ($RGB_{\text{имп1}}$);

3-й – импульсный на RGB LED ОУ: время светового импульса 1 с, темновой паузы 0,5 с ($RGB_{\text{имп2}}$).

В каждом опыте было 33 растения. Опыты проводились в 4-кратной повторности для получения достоверных результатов. Эксперимент продолжал-

Таблица 1

Table 1

МОНИТОРИНГ НАРАСТАНИЯ ПЛОЩАДИ ЛИСТЬЕВ РОЗЫ *IN VITRO* В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РЕЖИМА ОБЛУЧЕНИЯ
MONITORING OF THE INCREASE IN THE AREA OF ROSE LEAVES *IN VITRO* DEPENDING ON THE IRRADIATION REGIME

Номер пятидневки	$RGB_{\text{непр}}$		$RGB_{\text{имп1}}$		$RGB_{\text{имп2}}$	
	E , лк	S , мм ²	E , лк	S , мм ²	E , лк	S , мм ²
1	2421 ± 0,21	2,42 ± 0,19	2405 ± 0,16	2,36 ± 0,07	2367 ± 0,19	2,47 ± 0,16
2	2343 ± 0,29	2,69 ± 0,22	2356 ± 0,21	2,63 ± 0,19	2236 ± 0,21	2,8 ± 0,13
3	2339 ± 0,2	3,07 ± 0,15	2343 ± 0,29	2,96 ± 0,26	2321 ± 0,17	3,19 ± 0,11
4	2337 ± 0,26	3,25 ± 0,16	2335 ± 0,23	3,1 ± 0,17	2312 ± 0,21	3,44 ± 0,19
5	2304 ± 0,25	3,43 ± 0,16	2304 ± 0,25	3,22 ± 0,16	2302 ± 0,26	3,56 ± 0,19
Среднее значение	мм ²	2,972	–	2,854	–	3,092
Сумма S за 5 пятидневок	мм ²	14,86	–	14,27	–	15,46
	%	100	–	96,03	–	104,04
Разность $S_5 - S_1$	мм ²	1,01	–	0,86	–	1,09
	%	100	–	85,15	–	107,92

Условные обозначения: E – облученность, лк; S – площадь зеленых листьев пробирочного растения, мм².

Таблица 2

Table 2

СТАТИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ ПО ГРУППАМ / STATIC DATA BY GROUPS

Группы	Счет	Сумма	Среднее значение	Дисперсия
$RGB_{\text{непр}}$	165	490,472	2,972	0,223
$RGB_{\text{имп1}}$	165	471,016	2,854	0,187
$RGB_{\text{имп2}}$	165	510,049	3,092	0,262

ся 25 дней с контролем параметров каждые 5 дней (пять пятидневок).

За период выращивания 25 дней средняя площадь листьев оказалась максимальной при облучении $RGB_{\text{имп2}}$ и составила 3,09 см²; при облучении в контроле $RGB_{\text{непр}}$ – 2,97 см²; при режиме облучения $RGB_{\text{имп1}}$ – 2,85 см². Средняя площадь листьев под облучателем $RGB_{\text{имп2}}$ увеличилась на 4% по сравнению с контролем (100%). Динамика развития растений подтверждается разностью между площадью листьев в конце эксперимента (S_5) и в его начале (S_1). В режиме $RGB_{\text{имп2}}$ эта разность составила около 108% по сравнению с контролем (100%).

Расчет потребленной электроэнергии при работе RGB LED облучательной установки по 16 ч/сут в течение 25 дней показал, что в сравнении с контролем (100%) в режиме $RGB_{\text{имп1}}$ этот показатель составляет примерно 67%, в режиме $RGB_{\text{имп2}}$ – около

78%. Такой результат объясняется уменьшением длительности темновой паузы от 1 до 0,5 с. Но именно в данном случае активно увеличивается площадь листьев. Режим является не только энергосберегающим, но и энергоэффективным для культивирования розы *in vitro*.

Статистическая обработка экспериментальных данных проводилась по программе «Анализ данных» *MSEExcel* [21, 22]. Использовался метод однофакторного дисперсионного анализа [22, 23]. Результаты приведены в *таблице 2*.

Фактическое расчетное значение критерия Фишера ($F = 62,13$) указывает на статистически значимые различия между группами по площади листьев, так как оно больше критического значения Фишера. Следовательно, предлагаемый энергосберегающий режим облучения оказывает значительное влияние на рост листьев розы в культуре *in vitro*.

Результаты применения разработанной автоматизированной цифровой системы управления RGB LED ОУ для реализации энергосберегающей технологии облучения розы *in vitro* показали (*табл. 3*), что за пять пятидневок (25 дней) площадь поверхности листьев у меристемных растений розы нарастала быстрее всего в режиме $RGB_{\text{имп2}}$ и к концу эксперимента составила 104% (контроль 100%).

Таблица 3

Table 3

РЕЗУЛЬТАТЫ ОДНОФАКТОРНОГО ДИСПЕРСИОННОГО АНАЛИЗА / RESULTS OF UNIVARIATE ANALYSIS OF VARIANCE

Источник вариации	Сумма квадратов отклонений	Количество степеней свободы	Средний квадрат отклонений	Вероятность случайного отклонения	Значение критерия Фишера	
					Расчетное	Табличное
	SS	df	MS	P -значение	F	$F_{\text{критич}}$
Между группами	44,561	4	11,140	$7,02769 \cdot 10^{-46}$	62,13	2,38
Внутри групп	147,033	820	0,179	–	–	–
Итого	191,594	824	–	–	–	–

Выводы. Разработана автоматизированная цифровая система управления работой RGB светодиодными установками (RGB LED) для реализации энергосберегающего режима облучения. Самый интенсивный рост листьев розы в культуре *in vitro* наблюдался при длительности светового импульса 1 с и темновой 0,5 с (режим RGB_{имп2}). Разность между площадью листьев в конце и в начале эксперимента в этом случае составила примерно 108% относительно контроля (100%).

Потребление электроэнергии за 25 дней выращивания в режиме RGB_{имп1} составляет примерно 67%, в режиме RGB_{имп2} – около 78% относительно контроля (100%). Это объясняется снижением длительности темновой паузы в режиме RGB_{имп2} от 1,0 до 0,5 с. Но поскольку в этом режиме происходит

активное нарастание площади листьев, то предлагаемая энергосберегающая технология облучения имеет хорошую перспективу для выращивания розы в культуре *in vitro*.

Разработанные цифровые инженерно-технические решения позволяют реализовать энергосберегающую технологию облучения растений с помощью установки RGB LED и снизить расход электроэнергии при сохранении продуктивности растений.

Авторы выражают благодарность кандидату технических наук Андрею Ивановичу Батурину и кандидату физико-математических наук Ирине Андреевне Барановой за предоставление места для исследования и статистический анализ экспериментальных данных.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Минеев В.В., Елкин О.В., Алейников А.Ф. и др. Разработка устройства для диагностики пятнистостей земляники садовой // *Сибирский вестник сельскохозяйственной науки*. 2024. Т. 54. N10(311). С. 128-140. DOI: 10.26898/0370-8799-2024-10-13.
- Драгавцев В.А. Как «устроены» признаки продуктивности растений и почему России необходим селекционный фитотрон // *Труды Кубанского государственного аграрного университета*. 2018. N72. С. 134-141. DOI: 10.21515/1999-1703-72-134-141.
- Судаченко В.Н., Мишанов А.П., Маркова А.Е., Колянова Т.В. Методика выбора технологического оборудования для производства рассады овощных культур в интенсивной светокультуре // *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*. 2012. N83. С. 52-60. EDN: TFSFTD.
- Ноздрина Т.А. Применение источников излучения для выращивания растений в домашних условиях // *Наука без границ*. 2017. N4(9). С. 140-143. EDN: YLOHLN.
- Кондратьева Н.П., Большин Р.Г., Краснолуцкая М.Г. и др. Влияния спектра LED-облучательной установки с RGB-светодиодами на рост зеленого корма // *Вестник НГИЭИ*. 2025. N5(168). С. 17-28. DOI: 10.24412/2227-9407-2025-5-17-28.
- Дорохов А.С., Пыльнев В.В., Семенова Н.А. и др. Влияние спектрального состава света на накопление фотосинтетических пигментов и урожайность зерновых культур при выращивании в контролируемых условиях // *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. 2023. Т. 16. N3(78). С. 29-41. DOI: 10.53914/issn2071-2243_2023_3_29.
- Попов М.В., Бакиров С.М., Широкова Т.А. и др. Совершенствование теории светотехнического расчета для сельскохозяйственного производства // *Аграрный научный журнал*. 2024. N7. С. 125-131. DOI: 10.28983/asj.y2024i7pp125-131.
- Юферев Л.Ю. Энергосберегающее освещение сельскохозяйственных помещений и расчет его параметров // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Т. 15. N3. С. 28-34. DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-3-28-34.
- Кондратьева М.Г. Обоснование энергосберегающего режима облучения растений // *Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии*. 2014. N4(41). С. 41-44. EDN: THNDMF.
- Кондратьева Н.П., Большин Р.Г., Краснолуцкая М.Г. и др. Использование сквозных цифровых технологий с элементами нейросети/искусственного интеллекта в современном производстве // *Тенденции развития науки и образования*. 2024. N112-6. С. 91-94. DOI: 10.18411/trnio-08-2024-305.
- Большин Р.Г. Ресурсосберегающая и энергоэффективная система облучения гидропонных теплиц // *Вестник НГИЭИ*. 2024. N9(160). С. 40-51. DOI: 10.24412/2227-9407-2024-9-40-51.
- Кондратьева Н.П., Корепанов Р.И., Ильясов И.Р. и др. Эффективность микропроцессорной системы автоматического управления работой светодиодных облучательных установок // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. N3. С. 32-37. DOI: 10.22314/2073-7599-2018-12-3-32-37.
- Кондратьева Н.П., Шогенов Ю.Х., Зиганшин Б.Г., Ахатов Р.З. Использование цифровых технологий для эффективного управления электротехнологическими облучательными установками // *Техника и оборудование для села*. 2022. N4(298). С. 40-43. DOI: 10.33267/2072-9642-2022-4-40-43.
- Kondrateva N.P., Akhatov R.Z., Bolshin R.G. et al. Digital automation of energy-efficient *in vitro* irradiation of orchard plum micro cuttings. *Light & Engineering*. 2023. Vol. 31. N6. 57-64. DOI: 10.33383/2023-019.
- Ovchukova S.A., Kondratieva N.P., Kovalenko O.Y. Energy saving in lighting technologies of agricultural production.



- Light & Engineering*. 2021. Vol. 29. N2. 21-25. DOI: 10.33383/2020-039.
16. Долгих П.П., Трепуз С.В., Град Э.Я. и др. Влияние параметров электротехнологического облучения на эффективность выращивания различных сортов салата // *Успехи современного естествознания*. 2024. N4. С. 8-14. DOI: 10.17513/use.38242.
 17. Kudrin A.V., Zholaushin D.Zh., Kantarbayeva E.Ye., Baiseit G.A. Microclonal propagation of grain legume crops in vitro conditions. *Bulletin of the M. Kozubayev NKU*. 2024. N4(64). 135-140. DOI: 10.54596/2958-0048-2024-4-135-140.
 18. Васильков А.Ю., Повод У.Д. Регуляция роста и развития растений при микроклональном размножении оздоровленных растений // *Forcipe*. 2023. Т. 6. NS2. С. 582. EDN: СКВДКИ.
 19. Кутырёв А.И., Хорт Д.О., Филиппов Р.А., Ценч Ю.С. Магнитно-импульсная обработка семян земляники садовой // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2017. N5. С. 9-15. DOI: 10.22314/2073-7599-2017-5-9-15.
 20. Мазитов Н.К., Шогенов Ю.Х., Ценч Ю.С. Сельскохозяйственная техника: решения и перспективы // *Вестник ВИЭСХ*. 2018. N3 (32). С. 94-100. EDN: YLWHAL.
 21. Баранова И.А., Кондратьева Н.П., Батурина А.И., Батурина К.А. Сравнение влияния различных режимов облучения на увеличение площади листьев меристемных растений статистическими методами // *Вестник НГИЭИ*. 2022. N5(132). С. 55-64. DOI: 10.24412/2227-9407-2022-5-55-64.
 22. Подживотов Н.Ю. Оценка результатов испытаний с помощью однофакторного дисперсионного анализа // *Труды ВИИМ*. 2022. N8(114). С. 141-152. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-8-141-152.
 23. Загуменный Р.А., Николаева А.В., Панченко М.М. Влияние интенсивности освещения на всхожесть семян *Psidium guajava L.* в оранжерейном комплексе Донецкого ботанического сада // *Промышленная ботаника*. 2024. Т. 24. N4. С. 57-62. DOI: 10.5281/zenodo.14638307.

REFERENCES

1. Mineev V.V., Yolkin O.V., Aleynikov A.F. et al. Development of a device for diagnostics of garden strawberry spot diseases. *Siberian Herald of Agricultural Science*. 2024. Vol. 54. N10(311). 128-140 (In Russian). DOI: 10.26898/0370-8799-2024-10-13.
2. Dragavtsev V.A. «Arrangement» of quantitative characters of plant productivity and why russia is in want the breeding phytotrhone. *Proceedings of the Kuban State Agrarian University*. 2018. N72. 134-141 (In Russian). DOI: 10.21515/1999-1703-72-134-141.
3. Sudachenko V.N., Mishanov A.P., Markova A.E., Kolianova T.V. Selection procedure of technological equipment for growing vegetable transplants under intensive photoculture conditions. *AgroEcoEngineering*. 2012. N83. 52-60 (In Russian). EDN: TFSFTD.
4. Nozdrina T.A. Application of radiation sources for growing plants at home. *Science without borders*. 2017. N4(9). 140-143 (In Russian). EDN: YLOHLH.
5. Kondrateva N.P., Bolshin R.G., Krasnolutsкая M.G. et al. Effects of LED spectrum of irradiation system with RGB LEDs on green fodder growth. *Bulletin NGIEI*. 2025. N5 (168). 17-28 (In Russian). DOI: 10.24412/2227-9407-2025-5-17-28.
6. Dorokhov A.S., Pylnev V.V., Semenova N.A. et al. Effect of spectral composition of light on the accumulation of photosynthetic pigments and yield of grain crops grown in controlled conditions. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2023. Vol. 16. N3(78). 29-41 (In Russian). DOI: 10.53914/issn2071-2243_2023_3_29.
7. Popov M.V., Bakirov S.M., Shirobokova T.A. et al. Improving the theory of lighting technical calculations for agricultural production. *Agrarian Scientific Journal*. 2024(7). 125-131 (In Russian). DOI: 10.28983/asj.y2024i7pp125-131.
8. Yuferev L.Yu. Energysaving lighting of agricultural premises and its parameters calculation. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2021. Vol. 15. N3. 28-34 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-3-28-34.
9. Kondratyeva M.G. Justification of an energy saving mode of radiation of plants. *Bulletin of Izhevsk State Agricultural Academy*. 2014. N4(41). 41-44 (In Russian). EDN: THNDMF.
10. Bolshin R.G. Resource-saving and energy-efficient irradiation system for hydroponic greenhouses. *Bulletin NGIEI*. 2024. N 9 (160). 40-51 (In Russian). DOI: 10.24412/2227-9407-2024-9-40-51.
11. Kondratieva N.P., Korepanov R.I., Ilyasov I.R. et al. The efficiency of automated control microprocessor systems for LED irradiation installations. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2018. Vol. 12. N3. 32-37 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2018-12-3-32-37.
12. Kondratieva N.P., Shogenov Yu.Kh., Ziganshin B.G., Akhatov R.Z. The use of digital technologies for the effective management of electrotechnological irradiators. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2022. N4(298). 40-43 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2022-4-40-43.
13. Kondrateva N.P., Akhatov R.Z., Bolshin R.G. et al. Digital automation of energy-efficient in vitro irradiation of orchard plum micro cuttings. *Light & Engineering*. 2023. Vol. 31. N6. 57-64 (In English). DOI: 10.33383/2023-019.
14. Ovchukova S.A., Kondratieva N.P., Kovalenko O.Y. Energy saving in lighting technologies of agricultural production. *Light & Engineering*. 2021. Vol. 29. N2. 21-25 (In English). DOI: 10.33383/2020-039.
15. Dolgikh P.P., Trepuz S.V., Grad E.Ya. et al. Influence of electrotechnological irradiation parameters on the efficiency of growing different varieties of lettuces. *Advances in Current Natural Sciences*. 2024. N4. 8-14 (In Russian).

- DOI: 10.17513/use.38242.
17. Kudrin A.V., Zholaushin D.Zh., Kantarbayeva E.Ye., Baiseit G.A. Microclonal propagation of grain legume crops in vitro conditions. *Bulletin of the M. Kozybayev NKU*. 2024. N4(64). 135-140 (In English). DOI: 10.54596/2958-0048-2024-4-135-140.
 18. Vasilkov A.Yu., Povod U.D. Regulation of plant growth and development during microclonal reproduction of healthy plants. *Forcipe*. 2023. Vol. 6. NS2. 582 (In Russian). EDN: CKBDKI.
 19. Kutuyev A.I., Khort D.O., Filippov R.A., Tsench Yu.S. Magnetic-pulse treatment of garden strawberry seeds. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2017. N5. 9-15 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2017-5-9-15.
 20. Mazitov N.K., Shogenov Yu.Kh., Tsench Yu.S. Agricultural machinery: solutions and prospects. *Vestnik VIESH*. 2018. N3 (32). 94-100 (In Russian). EDN: YLWHAL.
 21. Baranova I.A., Kondrateva N.P., Baturin A.I., Baturina K.A. Comparison of the effect of different irradiation modes on the increase in the leaf area of meristem plants by statistical methods. *Bulletin of the NGIEI*. 2022. N5(132). 55-64 (In Russian). DOI: 10.24412/2227-9407-2022-5-55-64.
 22. Podzhivotov N.Yu. Assessment of results by means of the analysis of variance method. *Trudy VIAM*. 2022. N8(114). N12. 141-152 (In Russian). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-8-141-152.
 23. Zagumenny R.A., Nikolaeva A.V., Panchenko M.M. The influence of illumination intensity on the germination of Psidium guajava L. seeds in the greenhouse complex of the Donetsk Botanical Garden. *Industrial Botany*. 2024. Vol. 24. N4. 57-62 (In Russian). DOI: 10.5281/zenodo.14638307.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Кондратьева Н.П. – научное руководство, постановка основных целей и задач теоретических исследований, доработка текста статьи;

Батурина К.А. – сбор материалов по теме исследования и испытание автоматизированной системы управления, проведение экспериментов;

Большин Р.Г. – разработка и испытание автоматизированной системы управления, обработка полученных результатов, подготовка первоначального варианта текста;

Пантелеева Л.А. – решение организационных и технических вопросов по испытанию цифровых систем, подготовке текста.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Kondrateva N.P. – scientific supervision, setting the main goals and objectives of theoretical research, finalizing the text of the article;

Baturina K.A. – collection of materials on the research topic and testing of the automated control system, conducting experiments;

Bolshin R.G. – development and testing of an automated control system, processing of the obtained results;

Panteleeva L.A. – solving organizational and technical issues related to testing digital systems.

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

01.12.2025
26.01.2026

EDN: ZQXHMY

DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-1-19-24

Научная статья
УДК 631.331

Робот для подачи семян в селекционную сеялку

Максим Николаевич Московский¹,
доктор технических наук, профессор Российской
академии наук,
главный научный сотрудник,
e-mail: maxmoskovsky74@yandex.ru;

Андрей Сергеевич Чулков¹,
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: andrei.chulkov@mail.ru;
Яков Сергеевич Башлыков²,
инженер,
e-mail: oprodukt@mail.ru

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

²ООО СПК «Медведки», Тульская область, Ефремовский район, Российская Федерация

Реферат. В условиях импортозамещения необходимо усилить развитие селекции зерновых и других культур для создания новых сортов и наращивания объемов семенного материала. Роботизация техники в растениеводстве позволит быстрее справиться с данной задачей путем снижения затрат на ручной труд и повышения производительности на втором и третьем этапах селекционных работ. (*Цель исследования*) Создание робота для подачи семян в высевающий аппарат селекционной сеялки и выработка рекомендаций по его применению. (*Материалы и методы*) Робот разработан в соответствии с требованиями стандартов при посеве зерновых, зернобобовых и других культур на селекционных делянках. Предложен метод для определения применения одно- или многоуровневого робота для подачи семян в зависимости от площади селекционного участка. (*Результаты и обсуждение*) Разработали конструкционную схему и алгоритм действия робота карусельного типа, который может быть интегрирован в селекционные кассетные сеялки разных типов. Выведена формула применения робота для подачи семян в зависимости от параметров селекционного участка и требуемого количества кассет. (*Выводы*) Лабораторные исследования с использованием роботизированного кассетного загрузочного устройства или робота для подачи семян вместо выполнения операции вручную на втором и третьем этапах селекционных работ показали возможность сократить время посева на 12 процентов, увеличить производительность на 20-30 процентов.

Ключевые слова: зерновые культуры, посев, подача семян, кассетная селекционная сеялка, робот, кассета, блок кассет.

■ Для цитирования: Московский М.Н., Чулков А.С., Башлыков Я.С. Робот для подачи семян в селекционную сеялку // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2026. Т. 20. N1. С. 19-24. DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-1-19-24. EDN: ZQXHMY.

Scientific article

Seed Feeding Robot for Selection Seed Drill

Maxim N. Moskovskiy¹,
Dr.Sci.(Eng.), professor of the Russian Academy
of Sciences,
chief researcher,
e-mail: maxmoskovsky74@yandex.ru;

Andrey S. Chulkov¹,
Ph.D.(Eng.), leading researcher,
e-mail: andrei.chulkov@mail.ru;
Yakov S. Bashlykov²,
engineer,
e-mail: oprodukt@mail.ru

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

²ООО СПК «MEDVEDKI», Tula region, Efremovskiy district, Russian Federation

Abstract. In the context of import substitution, accelerating the development of grain, legume, and other crop breeding sectors is crucial to create new varieties and increase seed material volumes. Robotization of crop production operations can enable faster solution, cut manual labor costs, and enhance breeding productivity. (*Research purpose*) To design a seed-feeding robot for the sowing apparatus of a selection seed drill and develop recommendations for its use at the second and third stages of breeding. (*Materials and methods*) The robot was engineered to meet standards for sowing grains, legumes, and other crops on breeding plots. A method was proposed to select single- or multi-level robots for seed feeding based on the breeding area. (*Results and discussion*) A structural diagram and operation algorithm were developed for a carousel-type robot integrable into various

cassette selection seed drills. A formula was derived for robot application based on breeding site parameters and required cassette quantities. (*Conclusions*) Laboratory tests of the robotic cassette-loading device or seed-feeding robot at the second and third breeding stages demonstrated the potential for a 12 percent reduction in sowing time and 20–30 percent productivity.

Keywords: grain crops, sowing, seed feeding, cassette selection seed drill, robot, cassette, cassette block.

For citation: Moskovskiy M.N., Chulkov A.S., Bashlykov Ya.S. Seed feeding robot for selection seed drill. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2026. Vol. 20. N1. 19-24 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-1-19-24. EDN: ZQXHMY.

Создание новых сортов сельскохозяйственных культур и наращивание объемов семенного материала особенно актуальны в условиях импортозамещения продукцией отечественной селекции [1]. Роботизация в растениеводстве позволит повысить производительность работ и снизить долю ручных операций [2, 3].

В технологии селекционного посева применяются селекционные сеялки с порционными конусными высевальными аппаратами автономного высева на 2-м этапе и центрального распределения на 3-м этапе работ. Загрузку семян в конусный высевальный аппарат автономного высева выполняет кассетное загрузочное устройство (КЗУ). В конусный высевальный аппарат центрального распределения семена загружает оператор из пакетов вручную или используется КЗУ. Внедрение роботизированных устройств подачи семян в высевальный аппарат сеялки создаст возможность заменить ручные операции, сократить цикл посева на селекционных делянках и увеличить эффективность селекционных работ [4, 5].

Цель исследования: разработать робот для подачи семян (РПС) для загрузки высевальных аппаратов селекционной сеялки и рекомендации по применению разрабатываемого устройства на 2-м и 3-м этапах селекционных работ.

Материалы и методы. При разработке и исследовании схемы РПС учитывали требования ГОСТ Р 60.0.0.4–2019/ИСО 8373:2012 «Роботы и робототехнические устройства. Термины и определения» и ОСТ 46 73-78. Параметры посева на 2-м и 3-м эта-

пах селекционных работ согласно требованиям ОСТ 46 73-78 представлены в *таблице*.

Для 2-го этапа работ могут использоваться селекционные сеялки с конусными аппаратами автономного высева российского производства СКС-6-10, СССР-6, СССР-2 и зарубежные *Rowseed S (Wintersteiger AG, Австрия)* и др.

Для роботизация процесса подачи семян в высевальный аппарат сеялки учеными ФГБНУ ФНАЦ ВИМ было разработано роботизированное кассетное загрузочное устройство карусельного типа (*рис. 1*) (Патент RU 2806909, 2023 г.) [6].

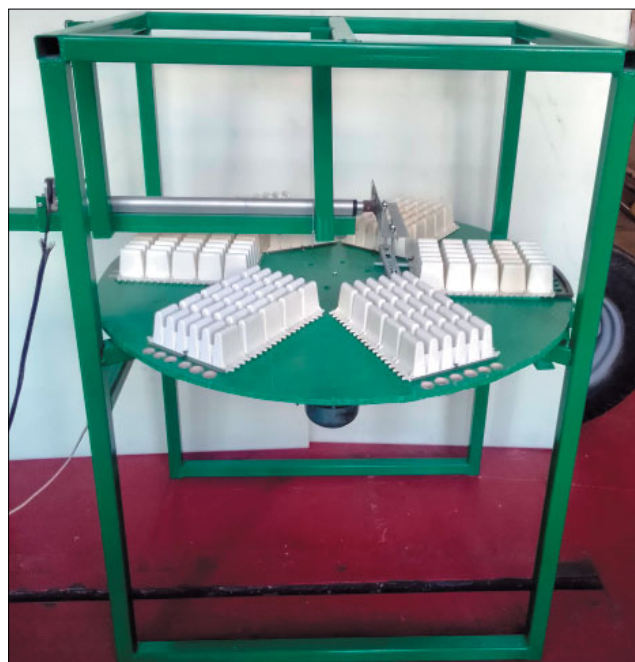


Рис. 1. Роботизированное кассетное загрузочное устройство карусельного типа селекционной сеялки
Fig. 1. Robotic cassette loading device of carousel type for a selection seed drill

В селекционной самоходной сеялке СССР-2 (*рис. 2*), разработанной ФГБНУ ФНАЦ ВИМ в 2024 г., применяется роботизированное кассетное загрузочное устройство для подачи кассет к высевальному аппарату и подачи блоков кассет без участия оператора [7].

Для 3-го этапа работ с конусным высевальным аппаратом центрального распределения применяют-

ПАРАМЕТРЫ СЕЛЕКЦИОННОГО ПОСЕВА SELECTION SOWING PARAMETERS		
Наименование	2-й этап	3-й этап
Длина делянки L_d , м	1-5	2-20
Ширина межъярусной дорожки m , м	Не более 2 м	Не более 6 м
Число рядков в делянке	1-6	3-10
Количество семян на делянку: зерновые культуры зернобобовые культуры	До 500 шт. До 300 шт.	До 1,0 кг До 1,7 кг



Рис. 2. Сеялка селекционная самоходная роботизированная СССР-2

Fig. 2. Self-propelled robotic selection seed drill SSSR-2

ся сеялки как российского производства (СН-10Ц(К), ССН-7, ССН-11 и др.), так и зарубежных фирм (*Wintersteiger AG*, Австрия; *Haldrup*, ФРГ и др.) [8].

На сеялке СН-10Ц(К) семена загружаются в высевной аппарат из кассет автоматически при помощи кассетного загрузочного устройства, а блоки кассет заменяет оператор вручную. Во всех других сеялках для 3-го этапа работ загрузку семян выполняет оператор из пакетов вручную.

В целях роботизации процесса подачи семян в высевной аппарат сеялки на селекционных делянках 3-го этапа работ [9, 10] без участия оператора предложено использовать РКЗУ карусельного типа. Поскольку площадь посева на этом этапе увеличивается, для обеспечения РКЗУ необходимым количеством кассет с семенами предложено усовершенствовать конструкцию устройства. Кассеты для загрузки семян должны состоять из одной ячейки. В соответствии с максимальной нормой высева на делянку для зерновых культур (1,0 кг, ОСТ 46 73-78) объем ячейки должен быть 1,2 л.

Кассеты с одной ячейкой объемом 1200 мл, изготовленные методом 3-D печати из ABS-пластика (рис. 3), последовательно нанизываются на направляющую пластину и образуют блок.

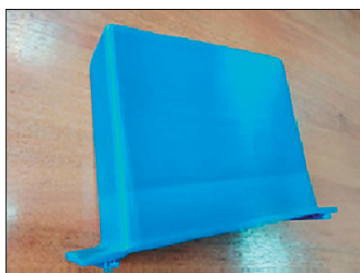


Рис. 3. Кассета для 3-го этапа селекционных работ с одной ячейкой

Fig. 3. Cassette of a selection seed drill with one cell for use at the third stage of breeding

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. В соответствии с ГОСТ Р 60.0.0.4–2023/ИСО 8373:2012 «Роботы и робототехнические устройства. Термины и определения» для подачи семян был разработан стационарный промышленный (сельскохозяйственный) робот карусельного типа (рис. 4) (Патент RU 2837393, 2025 г.).

В состав роботизированного устройства входит манипулятор перемещения кассет 1 и расположенных в них ячеек для семян к высевному аппарату 2. Кассеты нанизаны на направляющую пластину 3 и образуют кассетный блок 4.

Манипулятор работает под контролем блока управления 5 и представляет собой механизм с тремя степенями подвижности. На раме 6 находятся центральная неподвижная платформа 7 и внешняя подвижная многоуровневая платформа 8.

В рабочей зоне 10 перемещения кассет на центральной неподвижной платформе установлен актуатор 9, а под многоуровневой подвижной платформой – дополнительный актуатор 11, который поднимает внешнюю подвижную платформу 8 на один уровень в рабочую зону 10.

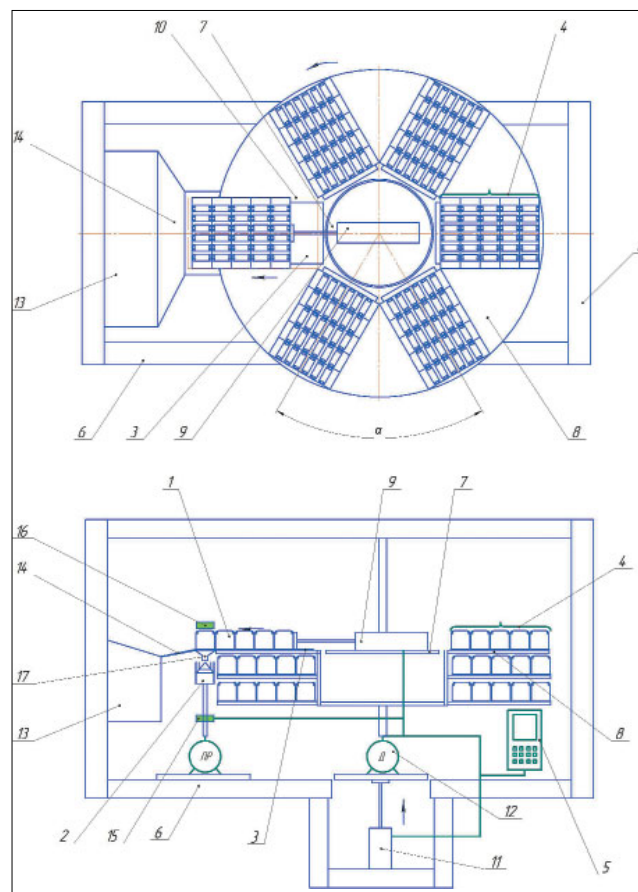


Рис. 4. Схема робота для подачи семян карусельного типа

Fig. 4. Diagram of a carousel-type seed feeding robot

На каждом уровне внешней подвижной платформы расположены по окружности с шагом α и зафик-

сированы блоки кассет. Платформа приводится во вращение шаговым электродвигателем 12. На раме за высевающим аппаратом расположен контейнер 13 с наклонным лотком 14 для сбора пустых кассет.

Устройство оснащено датчиками, связанными с блоком управления 5. На валу высевающего аппарата установлен датчик вращения 15, а над первой в очереди кассетой в рабочей зоне – датчик положения кассет 16.

Робот для подачи семян карусельного типа работает в соответствии с алгоритмом (рис. 5).

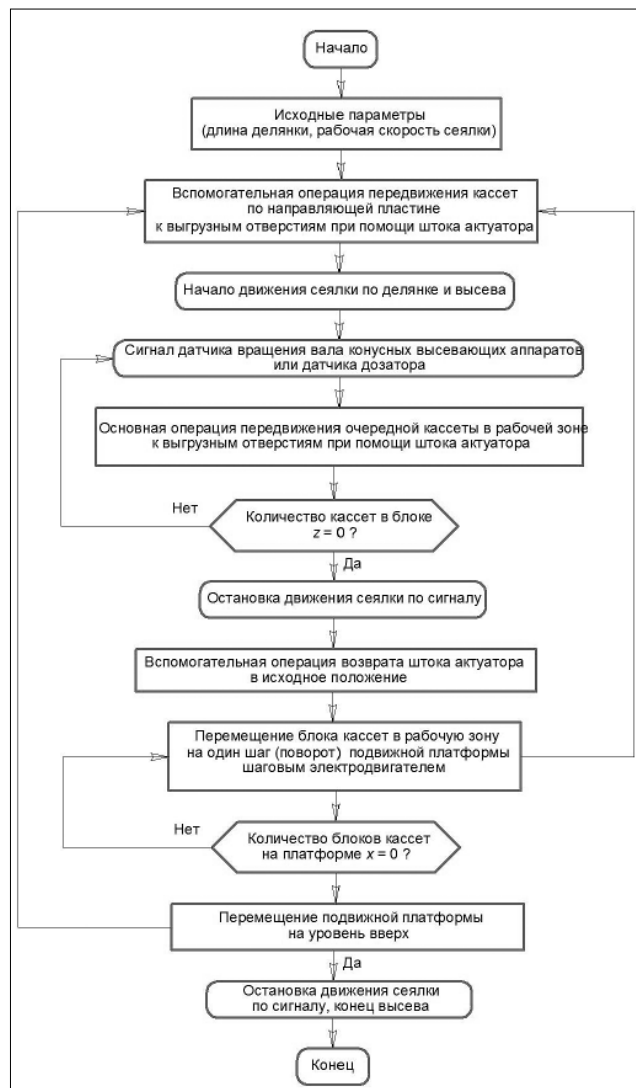


Рис. 5. Алгоритм работы робота карусельного типа с тактовой подачей кассет

Fig. 5. Operation algorithm for a carousel-type seed feeding robot with step-by-step cassette feeding

В алгоритме работы РКЗУ карусельного типа с тактовой подачей кассет отсутствует перемещение подвижной платформы 8 на уровень вверх.

Перед началом посева селекционер устанавливает на подвижной многоуровневой платформе 8 блоки кассет с семенами в соответствии с заданной

нормой высева. Сеялка подъезжает к началу деланки, оператор включает блок управления 5. Манипулятор выполняет вспомогательную операцию подачи первой в очереди кассеты к распределителю 17 при помощи штока актуатора 9. Первая порция семян загружается через выгрузные отверстия распределителя и в стакан дозатора высевающего аппарата.

При движении сеялки начинается основная операция посева. Следующие в очереди кассеты по направляющей пластине 3 в тактовом режиме подаются к распределителю 8 при помощи штока актуатора 9 по сигналу датчика вращения 15 высевающего аппарата или стакана дозатора.

Освобожденная от семян кассета сходит по наклонному лотку 14 в контейнер 13. После схода всех кассет с направляющей пластины под контролем датчика положения 16 штока актуатора 9 возвращается в исходное положение.

Далее по звуковому сигналу тракторист останавливает сеялку, шаговый электродвигатель 12 поворачивает внешнюю подвижную платформу 8 на угол α (в данной конструкции РПС $\alpha = 60^\circ$) и перемещает следующий блок кассет в рабочую зону 10. Процессы подачи кассет к высевающему аппарату актуатором 9 и перемещения кассетных блоков на текущем уровне подвижной платформы повторяются.

После освобождения от семян всех блоков кассет на текущем уровне тракторист останавливает сеялку, и манипулятор при помощи дополнительного актуатора 11 поднимает подвижную платформу с блоками кассет на один уровень вверх. Подача кассет с семенами, перемещение блоков кассет и перемещения на уровень вверх подвижной платформы с установленными на ней блоками кассет продолжают до тех пор, пока на платформе 8 не останется ни одной кассеты с семенами.

После засева всех деланок, процесс высева считается законченным.

РПС карусельного типа интегрируется в селекционную сеялку для зерновых и зернобобовых культур.

Разработан метод для определения типа робота для подачи семян (одно- или многоуровневого) в зависимости от площади селекционного участка. Потребное количество кассет на площадь посева определяется по формуле:

$$n_k = \frac{S_y}{P(L_d + m)}, \quad (1)$$

где S_y – площадь селекционного участка, m^2 ; P – ширина посева, m ; L_d – длина деланки, m ; m – ширина межъярусной дорожки, m .

Например, для проведения полевых исследований в одном из хозяйств ООО СПК «Медведки» (Россия, Тульская область, Ефремовский район) на

селекционный участок размером $S_y = 100 \text{ м}^2$ при ширине посева $P = 1,25 \text{ м}$, длине делянки $L_d = 2 \text{ м}$ и ширине междурядной дорожки $m = 1 \text{ м}$ необходимое количество кассет для посева $n_k = 27$ шт. (предварительные расчеты).

Количество уровней платформы робота определяется по следующей формуле и округляется до целого числа в большую сторону:

$$Y = n_k / z, \quad (2)$$

где z – количество кассет, размещаемое на одном уровне, шт.

Для РКЗУ карусельного типа $z = 30$ шт., соответственно $Y = 27/30 = 0,9$, т.е. нужна платформа с одним уровнем.

Исходя из нужного количества кассет, селекционер принимает решение, какую систему подачи семян использовать – роботизированное кассетное загрузочное устройство (РКЗУ) или робот для подачи семян (РПС). В случае, когда $Y \leq 1$ применяется РКЗУ, а если $Y > 1$, то РПС.

В ФГБНУ ФНАЦ ВИМ в 2025 г. разработана навесная селекционная сеялка зерновых и зернобобовых культур для 3-го этапа селекционных работ (рис. 6). РКЗУ интегрирована в навесную селекционную сеялку *Plotseed S* – ВИМ (производства *Wintersteiger* – ВИМ).

В ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (Москва) в 2025 г. проведены лабораторные исследования по применению РКЗУ или РПС на 3-м этапе селекционных работ при рядном посеве озимой пшеницы сорта «Немчиновская 85», с числом рядов 10, длиной делянки 2 м и длиной междурядной дорожки 1 м. Подача кассет и блоков кассет роботом происходила в необходимом режиме без отказов. По сравнению с выполнением ручных операций длительность посева уменьшилась на 12%, трудозатраты – до 2 раз, производительность увеличилась на 20%. При проверке сеялки на высеивались показатели равномерности высева в рядах. Коэффициент вариации распределения семян в рядах не превышает 4%.

Выводы. Разработан стационарный промыш-



Рис. 6. Сеялка селекционная роботизированная ССР-3
Fig. 6. Robotic selection seed drill SSR-3

ленный (сельскохозяйственный) робот для подачи семян карусельного типа и загрузки высевочного аппарата конусного типа селекционной сеялки на 2-м и 3-м этапах работ.

Предложено заменить ручную подачу оператором порций семян в высевочный аппарат на роботизированную подачу в кассетах РКЗУ или РПС карусельного типа. Роботизированные устройства интегрируются в селекционные сеялки 2-го и 3-го этапов работ. Вид робота – одно- или многоуровневого зависит от площади селекционного участка.

Лабораторные исследования показали, что в случае использования РКЗУ или РПС вместо оператора-сеяльщика при посеве зерновых культур на 3-м этапе селекционных работ снижаются время цикла посева до 12%, трудозатраты до 2 раз, производительность увеличивается на 20-30%. Коэффициент вариации распределения семян в рядах не превышает 4%.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Измайлов А.Ю. Интеллектуальные технологии и роботизированные средства в сельскохозяйственном производстве // *Вестник Российской академии наук*. 2019. Т. 89. N5. С. 536-538. DOI: 10.31857/S0869-5873895536-538.
- 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.
- 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.
- Ценч Ю.С., Несмиян А.Ю., Хомутова Н.С. История развития конструкции высевочных аппаратов зерновых сеялок // *Вопросы истории естествознания и техники*. 2020. Т. 41. N1. С. 102-117. DOI: 10.31857/S020596060008429-3.
- Лачуга Ю.Ф., Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П. и др. Научно-технические достижения агроинженерных научных учреждений для производства основных групп сельскохозяйственной продукции // *Техника и оборудование для села*. 2021. N 4(286). С. 2-11. DOI: 10.33267/2072-9642-2021-4-2-11.
- Чулков А.С., Чаплыгин М.Е., Шайхов М.М. Роботизированное кассетное загрузочное устройство карусельного типа для селекционной сеялки // *Вестник Воронежского государственного аграрного университе-*

- ма. 2024. Т. 17. N3(82). С. 99-107. DOI: 10.53914/issn2071-2243_2024_3_99-107.
7. 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.
 8. 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.
 9. Несмиян А.Ю., Ценч Ю.С. Тенденции и перспективы развития отечественной техники для посева зерновых культур // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. N3. С. 45-52. DOI: 10.22314/2073-7599-2018-12-3-45-52.
 10. 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.

REFERENCES

1. Izmaylov A.Yu. Smart technologies and robotic means in agricultural production. *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2019. Vol. 89. N5. 536-538 (In Russian). DOI: 10.31857/S0869-5873895536-538.
2. 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 VIESH*. 2018. N4(33). 150-156 (In Russian). EDN: YTHPID.
3. 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.
4. 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.
5. Lachuga Yu.F., Izmailov A.Yu., Lobachevsky Ya.P. et al. Scientific and technical results of agro-engineering scientific institutions for the production of main groups of agricultural products. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2021. N4(286). 2-11 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2021-4-2-11.
6. Chulkov A.S., Chaplygin M.E., Shaykhov M.M. Carousel type robotic cassette loading device for breeding seeder. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2024. N17(3). 99-107 (In Russian). DOI: 10.53914/issn2071-2243_2024_3_99-107.
7. 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.
8. Lobachevsky 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.
9. Nesmiyan A.Yu., Tsench Yu.S. Tendencies and prospects for the development of domestic machinery for sowing grain crops. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2018. Vol. 12. N3. P.45-52 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2018-12-3-45-52.
10. 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 Russian). DOI: 10.25165/j.ijabe.20211403.6218.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Московский М.Н. – методология, анализ литературных источников, итоговая доработка текста, формирование общих выводов;

Чулков А.С. – написание статьи и оформление материалов, обработка данных испытаний, анализ литературных источников, формирование общих выводов, итоговая переработка статьи;

Башлыков Я.С. – проведение и обработка данных испытаний, итоговая доработка текста.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Moskovskiy M.N. – methodology, analysis of literary sources, final manuscript refinement, formulation of general conclusions;

Chulkov A.S. – writing the manual initial draft and design of materials, test data processing, analysis of literary sources, formulation of general conclusions, final manuscript revision;

Bashlykov Ya.S. – conducting and processing test data, final manuscript revision and 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

01.12.2025

25.02.2026

EDN: PFIUSI

DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-1-25-30



Научная статья

УДК 629.018



Определение допустимых значений параметров рабочих органов селекционного зерноуборочного комбайна

Михаил Евгеньевич Чаплыгин¹,
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: misha2728@yandex.ru;

Кирилл Сергеевич Дмитриев²,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: kir0597@yandex.ru;
Александр Сергеевич Овчаренко¹,
младший научный сотрудник,
e-mail: peterbilt@list.ru

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

²Московский политехнический университет, Москва, Российская Федерация

Реферат. Одной из серьезных проблем механизации отечественной селекции остается недостаточный уровень технического оснащения системами автоматического управления рабочими органами, в том числе с элементами искусственного интеллекта. В технологии механизированной уборки большая часть регулировок параметров под изменяющиеся условия уборки осуществляется механизатором вручную. В связи с этим актуальна разработка методов автоматического регулирования параметров рабочих органов для повышения точности уборки на протяжении всего уборочного процесса, в том числе для селекционных зерноуборочных комбайнов, где особенно важно минимизировать потери и повреждение семенного материала. (*Цель исследования*) Определить области допустимых значений параметров рабочих органов селекционного зерноуборочного комбайна на основе оценки характеристик хлебостоя методом математического моделирования. (*Материалы и методы*) Определение математических зависимостей взаимосвязанных параметров линейного хода комбайна и частоты работы режущего аппарата, получение области допустимых значений графическим способом. (*Результаты и обсуждение*) Математически и графически определены области допустимых значений параметров рабочих органов селекционного зерноуборочного комбайна на основе оценки характеристик хлебостоя с учетом диапазонов работы комбайна и плотности хлебостоя: скорости движения комбайна от 1 до 2 метров в секунду, частоты работы режущего аппарата 200-800 оборотов в минуту, плотность хлебостоя 200-600 стеблей на один метр квадратный. Сформулированы и визуализированы зависимости между параметрами хлебостоя и режимами работы комбайна, что позволяет определить область допустимых значений. (*Выводы*) Полученные модели могут быть использованы в разрабатываемых интеллектуальных системах управления жатвенной частью и скоростью комбайна для повышения эффективности уборки и минимизации потерь. Подтверждена применимость модели для реализации в системах автоматизированного регулирования в реальных условиях.

Ключевые слова: селекционный комбайн, автоматизированное управление, режущий аппарат, адаптивное управление, потери зерна, техническое зрение, математическое моделирование.

■ **Для цитирования:** Чаплыгин М.Е., Дмитриев К.С., Овчаренко А.С. Определение допустимых значений параметров рабочих органов селекционного зерноуборочного комбайна // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2026. Т. 20. №1. С. 25-30. DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-1-25-30. EDN: PFIUSI.

Scientific article

Determination of Permissible Operating Parameters for the Working Units of a Breeding Plot Harvester

Mikhail E. Chaplygin¹,
Ph.D.(Eng.), senior researcher,
e-mail: misha2728@yandex.ru;

Kirill S. Dmitriev²,
Ph.D.(Eng.), associate professor,
e-mail: kir0597@yandex.ru;
Aleksandr S. Ovcharenko¹,
junior researcher,
e-mail: peterbilt@list.ru

Abstract. One of the major challenges in the mechanization of domestic breeding remains the insufficient level of technical equipment incorporating automatic control systems for working units, including AI-based solutions. In mechanized harvesting

technology, most adjustments of operating parameters in response to changing harvesting conditions are still performed manually by the operator. Therefore, the development of automatic control methods aimed at improving harvesting accuracy throughout the entire harvesting process is highly relevant, particularly for breeding grain harvesters, where minimizing losses and damage to seed material is of critical importance. (*Research purpose*) To determine the permissible parameter values for the working units of a breeding plot harvester through mathematical modeling based on an assessment of crop stand characteristics. (*Materials and methods*) Mathematical relationships between the interrelated parameters of the harvester's linear travel speed and the operating frequency of the cutting unit were established, and the permissible parameter values for the working units of a breeding plot harvester were obtained using a graphical approach. (*Results and discussion*) The permissible parameter values for the working units of a breeding plot harvester were obtained using mathematical and graphical methods based on crop stand characteristics, taking into account the operating ranges of the harvester and crop stand density. The following parameters were established: harvester travel speed of 1-2 meters per second, cutting unit operating frequency of 200-800 revolutions per minute, and crop stand density of 200–600 stems per square meter. Functional relationships between crop stand parameters and harvester operating modes were formulated and visualized, enabling the determination of permissible parameters. (*Conclusions*) The derived models can be used in the development of intelligent control systems for the header assembly and harvester travel speed to improve harvesting efficiency and minimize losses. The applicability of the proposed model for implementation in automated control systems under real operating conditions has been confirmed.

■ **For citation:** Chaplygin M.E., Dmitriev K.S., Ovcharenko A.S. Determination of permissible operating parameters for the working units of a breeding plot harvester. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2026. T. 20. N1. С. 25-30. DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-1-25-30. EDN: PFIUSI

Острой проблемой отечественной отрасли селекции остается недостаточная обеспеченность современными техническими средствами, в частности тяговыми и транспортно-технологическими машинами [1, 2]. В то же время ключевыми векторами развития мобильной техники в агропромышленном комплексе выступают повышение энергоэффективности, снижение экологической нагрузки, расширение автоматизации процессов и внедрение роботизированных комплексов [3-5]. Несмотря на схожее с зерноуборочными комбайнами общее назначение и применяемые технические решения, к селекционным комбайнам предъявляются существенно более жесткие требования в части исключения сортосмешения в процессе уборки при переходе с одной делянки на другую, минимизировать потери и повреждение зерна, чтобы максимально сохранить ценный семенной материал.

Сохранить целостность зерна возможно при идеальной согласованности функционирования рабочих органов комбайна, однако следует учитывать, что параметры убираемого хлебостоя могут существенно различаться даже в пределах одной делянки [6]. Некоторые параметры могут регулироваться вручную, причем точность регулирования будет зависеть от опыта и степени вовлеченности комбайнера в процесс уборки, а визуальная оценка параметров хлебостоя и режимов работы рабочих органов зачастую затруднена. При дефиците в отрасли высококвалифицированных кадров одним из решений данного вопроса является создание автоматической системы управления (АСУ) параметрами рабочих органов с оценкой состояния убираемой культуры. Так, снижение плотности хлебостоя

приводит к недогрузке молотильно-сепарирующего устройства [7] и дроблению зерна, а при повышении плотности – к забиванию и заклиниванию режущего аппарата [8], забиванию молотильно-сепарирующего устройства (МСУ).

Современные достижения в области технологий применения искусственного интеллекта (ИИ) и технического зрения открывают новые возможности для мониторинга и управления процессом уборки зерновых культур с использованием зерноуборочных комбайнов. На базе математических моделей, описывающих динамику действия рабочих органов агрегата, предложены системы отслеживания качества уборки, оценки плотности распределения урожая и выявления нарушений технологического процесса в режиме реального времени [9].

К ключевым направлениям интеграции ИИ в уборочную технику относится создание автоматических систем управления рабочими органами комбайна. В таких системах используются алгоритмы глубокого обучения для анализа параметров комбайна в реальном времени, а также внешних показателей и высокочувствительных датчиков, например, видеопотоков с бортовых камер для определения характеристик убираемой культуры. Так, современные системы технического зрения, реализующие архитектуры нейронных сетей (например, *YOLO*, *Faster R-CNN*), успешно применяются для сегментации изображения, распознавания и классификации убираемой культуры [10]. На основе полученных данных автоматическая система управления с искусственным интеллектом позволяет прогнозировать эффективность уборочного процесса и оперативно корректировать эксплуатационные режимы [11].

Практический опыт применения таких моделей подтвержден в ряде научных исследований. В работе [12] описана структурная экономико-математическая модель, позволяющая оптимизировать энергозатраты и повысить эффективность работы зерноуборочных комбайнов. В рамках данной методологии интеграция систем ИИ и компьютерного зрения обеспечивает возможность автоматизированного контроля качества уборки и оперативного принятия решений на основе анализа видеоданных. Аналогичные подходы демонстрируются в исследованиях цифровых двойников сельскохозяйственной техники, где модели взаимодействия рабочих органов с культурой успешно используются для создания алгоритмов распознавания состояния зерноуборочного процесса [13].

Цель исследования: определить области допустимых значений параметров рабочих органов селекционного зерноуборочного комбайна на основе оценки состояния хлебостоя.

Материалы и методы. При работе селекционного комбайна целесообразно отслеживать несколько типов данных, в частности текущую скорость движения, сопротивление на режущем аппарате, плотность хлебостоя. Полученные данные позволяют своевременно оценить ситуацию при помощи АСУ за счет расчета ожидания и скорости изменения сопротивления (градиента), после чего происходит корректировка скорости движения комбайна и частоты работы режущего аппарата. Схема типа «черный ящик» для АСУ приведена на *рисунке 1*.

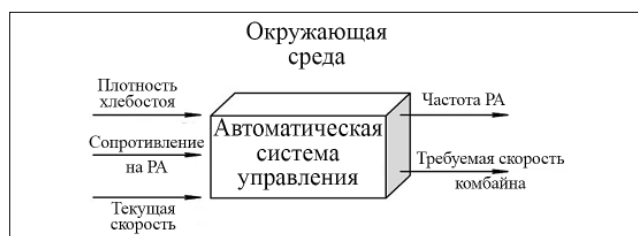


Рис. 1. Блок-схема автоматической системы управления: РА – режущий аппарат

Fig. 1. Block diagram of the automated control system: РА – cutting unit

Для описания зависимости частоты работы режущего аппарата жатки (f , Гц) и линейной скорости движения комбайна (v , м/с) от объема убираемой хлебной массы (ρ , стеблей/м²) необходимо учитывать, что с увеличением плотности хлебной массы повышается нагрузка на режущий аппарат [14]. Соответственно необходимо увеличить частоту работы режущего аппарата и снизить линейную скорость комбайна, чтобы обеспечить качественный срез и избежать потерь.

Для определения граничных значений моделирования были определены физические границы работы комбайна.

Относительно рассматриваемых моделей ВИМ-110, *Wintersteiger Classic* и других подобных типов селекционных комбайнов для уборочных работ выявлены следующие диапазоны:

- v – скорость движения комбайна от 1 до 2 м/с;
- f – частота работы режущего аппарата от 200 до 800 мин⁻¹;
- ρ – плотность хлебостоя от 200 до 600 стеблей/м².

Скорость движения селекционного зерноуборочного комбайна обусловлена балансом производительности и допустимым количеством потерь зерна [15].

Диапазон частоты работы режущего аппарата определяется необходимой скоростью движения режущих кромок сегментов в сегментно-пальцевом режущем аппарате, которая составляет 1-3 м/с [16]. Таким образом, при стандартном шаге ножа режущего аппарата, равном 76,5 мм, частота работы режущего аппарата должна составлять порядка 400-1200 мин⁻¹. При измерении параметров реального режущего аппарата селекционного комбайна типа ВИМ-110 получены значения частоты вращения приводного вала от 107 до 394 мин⁻¹. С учетом передаточного отношения 1:1 и кинематической схемы привода с кривошипно-шатунным механизмом это дает удвоенную частоту работы режущего аппарата от 214 до 792 мин⁻¹. Несоответствие количества хлебостоя негативно влияет на качество работы режущего аппарата. Так, избыточное количество срезаемых стеблей может привести к забиванию и заклиниванию режущего аппарата, а недостаточное – к потерям и травмированию семян [17].

В работе был определен диапазон плотности хлебостоя. Для определения количества стеблей на единицу площади было принято исходить из нормы высева зерновых культур, в частности яровых и озимых сортов пшеницы и ячменя, где нижнее значение соответствует регионам с неблагоприятными условиями произрастания, а верхние – для регионов с высокой урожайностью. В умеренно-влажных зонах и при хорошей влагообеспеченности обычно сеют 4-6 млн шт/га (400-600 шт/м²). Так, в лесостепи и Поволжье для твердой яровой пшеницы рекомендуют около 3,0-4,5 млн шт/га (300-450 шт/м²), норма высева озимого ячменя – 2,5-4,5 млн шт/га всхожих семян, или 250-450 шт/м² (О-627). Оптимальные нормы высева пшеницы и ячменя для получения семян с высокими посевными качествами в южной лесостепи Западной Сибири: рекомендации. Омск: ФГБНУ «Омский АНЦ», 2024. 40 с. Приложение N3 к Методике баланса ресурсов и использования зерна по видам культур (пшеница, рожь, ячмень, кукуруза, рис), утв. приказом Росстата от 28.03.2022 N 156).

Результаты и обсуждение. Первично приведем линейные математические зависимости работы ком-

байна от плотности хлебостоя, таким образом задав область допустимых значений работы режущего аппарата и скорости движения зерноуборочного комбайна относительно плотности хлебостоя.

Зависимость частоты работы режущего аппарата от плотности хлебостоя. Работу режущего аппарата необходимо регулировать таким образом, чтобы при увеличении плотности хлебостоя возрастала частота работы режущего аппарата. Принимаем следующие значения:

$$\begin{aligned} \text{при } \rho = 200 \text{ стеблей/м}^2 &\Rightarrow f = 200 \text{ мин}^{-1}; \\ \text{при } \rho = 600 \text{ стеблей/м}^2 &\Rightarrow f = 800 \text{ мин}^{-1}. \end{aligned}$$

Следовательно, линейная зависимость по граничным значениям диапазона для частоты работы режущего аппарата

$$f(\rho) = 1,5\rho - 100. \quad (1)$$

Аналогично для линейного движения комбайна при увеличении плотности хлебостоя скорость движения необходимо снизить. Исходя из общей производительности комбайна примем следующие параметры:

$$\begin{aligned} \text{при } \rho = 200 \text{ стеблей/м}^2 &\Rightarrow v = 2 \text{ м/с}; \\ \text{при } \rho = 600 \text{ стеблей/м}^2 &\Rightarrow v = 1 \text{ м/с}. \end{aligned}$$

Следовательно, линейная зависимость по граничным значениям диапазона

$$v(\rho) = -0,0025\rho + 2,5. \quad (2)$$

Сумма линейных зависимостей для определения области допустимых значений работы режущего аппарата и хода комбайна от плотности хлебостоя

$$\begin{cases} f(\rho) = 1,5\rho - 100 \\ v(\rho) = -0,0025\rho + 2,5 \end{cases} \quad (3)$$

Составим матрицу значений точек для построения графика зависимости работы комбайна от плотности хлебостоя:

$$M = [xyz] = \begin{bmatrix} 1 & 800 & 600 \\ 1 & 200 & 600 \\ 1,5 & 200 & 400 \\ 2 & 200 & 200 \\ 2 & 300 & 200 \\ 1,5 & 500 & 400 \\ 1 & 800 & 600 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где v – скорость движения комбайна $x = [1,0; 1,0; 1,5; 2,0; 2,0; 1,5; 1,0]$; f – частота работы режущего аппарата $y = [800, 200, 200, 200, 300, 500, 800]$; ρ – плотность хлебостоя $z = [600, 600, 400, 200, 200, 400, 600]$.

На *рисунке 2* приведен график, отражающий область допустимых значений регулируемых параметров селекционного зерноуборочного комбайна. В пределах этой области могут изменяться рассмотренные регулируемые параметры. Цветовой градиент отображает изменение плотности хлебостоя и ее увеличение, что приводит к росту нагрузки на рабочие органы комбайна.

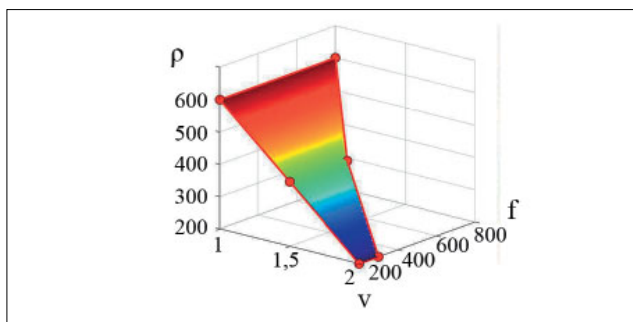


Рис. 2. График плоскости, образованной областью допустимых значений параметров рабочих органов зерноуборочного комбайна

Fig. 2. The plane formed by acceptable parameter ranges for the working units of a grain harvester

В дальнейших исследованиях планируется уточнить области значений регулируемых параметров, ввод новых переменных – силы сопротивления резанию [18], влажности хлебостоя, сопротивления качению колес комбайна, массы, а также определить соответствующие нелинейные зависимости работы комбайна относительно изменяющихся показателей плотности и влажности убираемого хлебостоя [19].

Выводы. Определены и обоснованы области допустимых значений входных параметров для регулирования основных рабочих органов селекционного зерноуборочного комбайна на основе анализа характеристик хлебостоя. Установлено, что линейная скорость движения комбайна должна изменяться в диапазоне от 1,0 до 2,0 м/с, частота работы режущего аппарата – в пределах 200-800 мин⁻¹, а плотность хлебостоя, определяющая рабочие режимы, варьируется от 200 до 600 стеблей/м².

Построенные математические зависимости показали линейную корреляцию между плотностью хлебостоя и частотой работы режущего аппарата $f(\rho) = 1,5\rho - 100$, а также обратную связь между плотностью урожая и скоростью движения комбайна $v(\rho) = -0,0025\rho + 2,5$. Построенный график области допустимых значений параметров рабочих органов позволяет адаптивно их регулировать, снижая возможные перегрузки и потери зерна.

Применение предложенной модели в разрабатываемых автоматических системах управления, интегрированных в селекционные зерноуборочные комбайны типа ВИМ-110, *Wintersteiger Classic* позволит повысить точность согласования подачи срезанной хлебной массы и пропускной способности молотильно-сепарирующего устройства, снизить потери зерна за счет оптимизации частоты резания, уменьшить влияния человеческого фактора и долю ручных регулировок.

Выявленные зависимости между характеристиками хлебостоя, в рассматриваемом случае – плотно-

стью, и технологическими режимами работы комбайна – скоростью движения, частотой вращения рабочих органов позволяют выделить область допустимых значений режимов работы, обеспечивающих устойчивое функционирование комбайна в условиях изменяющихся характеристик убираемой культуры.

Разработанные математические модели обладают практической значимостью и могут быть интегрированы в интеллектуальные системы адаптив-

ного управления как движением комбайна, так и работой жатвенной части. Доработка модели путем рассмотрения дополнительных механизмов комбайна и агрофизических свойств хлебостоя (влажность растений, высота среза и др.) расширит возможность автоматической системы управления по адаптации частоты вращения под разные порции убираемой продукции, в итоге привести к полной автоматизации и интеллектуализации уборочной техники.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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.
2. Шаров В.В., Ценч Ю.С. Приоритеты России в мировом тракторостроении. *Доклады ТСХА*. 2019. Вып. 291. Ч. 2. С. 446-448. EDN: FJMOLR.
3. Лобачевский Я.П., Лачуга Ю.Ф., Измайлов А.Ю., Шогенов Ю.Х. Инновационные достижения агроинженерных научных учреждений в условиях развития цифровых систем в сельском хозяйстве // *Техника и оборудование для села*. 2024. N5(323). С. 2-9. DOI: 10.33267/2072-9642-2024-5-2-8.
4. 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.
5. Чаплыгин М.Е., Старостин И.А., Овчаренко А.С. Концептуальные основы создания электрического селекционного комбайна с комбинированной энергетической установкой // *Инженерные технологии и системы*. 2025. N2. С. 266-283. DOI: 10.15507/2658-4123.035.202502.266-283.
6. Чаплыгин М.Е., Жалнин Э.В. Определение качества работы зерноуборочных комбайнов // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2019. Т. 13. N4. С. 71-76. DOI: 10.22314/2073 7599 2019 13 4 71 76.
7. Li W., Zhang K., Lv G. et al. An improved fuzzy logic control method for combine harvester's cleaning system. *Automatic Control and Computer Sciences*. 2022. N56(4). 337-346. DOI: 10.3103/S0146411622040058.
8. Димитров В.П., Борисова Л.В., Нурутдинова И.Н., Папченко А.А. О задаче корректировки регулируемых параметров роторного зернокомбайна // *Вестник аграрной науки Дона*. 2024. Т. 17. N2(66). С. 4-13. DOI: 10.55618/20756704_2024_17_2_4-13.
9. Ожерельев В.Н., Погонишев В.А., Погонишева Д.А. и др. Вопросы управления эксплуатацией зерноуборочной техники с использованием метода моделирования // *Вестник Брянской ГСХА*. 2025. N2 (108). С. 62-67. DOI: 10.21515/1990-4665-208-040.
10. Смирнов И.Г., Хорт Д.О., Кутырев А.И. Интеллектуальные технологии и роботизированные машины для возделывания садовых культур // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Т. 15. N4. С. 35-41. DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15- 35-41.
11. Goossens J., Lenaerts B., Devos S. et al. Anomaly detection on the cutter bar of a combine harvester using cyclostationary analysis. *Biosystems Engineering*. 2023. Vol. 226. 169-181. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2023.01.013.
12. Димитров В.П., Борисова Л.В., Нурутдинова И.Н. Метод определения начальных значений регулируемых параметров жатвенной части зерноуборочного комбайна // *Инженерные технологии и системы*. 2022. Т. 32. N4. С. 552-566. DOI: 10.15507/2658-4123.032.202204.552-566.
13. Qin F., Zhao C., Wang Q. et al. Grain combine harvester header profiling control system development and testing. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2024. Vol. 223. 109082. DOI: 10.1016/j.compag.2024.109082.
14. Минин П.С., Ловчиков А.П. К обоснованию конструктивных параметров режущего аппарата бесподпорного резания для комбайновых жаток с поступательным движением режущих элементов // *Вестник КрасГАУ*. 2013. N8 (83). С. 161-167. EDN: RYBWAZ.
15. Михальцов Е.М., Кем А.А., Даманский Р.В. и др. О соответствии производительности отечественных зерноуборочных комбайнов и урожайности зерновых и зернобобовых культур в России // *Агроинженерия*. 2023. N5 (25). С. 23-28. DOI: 10.26897/2687-1149-2023-5-23-28.
16. Алдошин Н.В., Золотов А.А., Лылин Н.А. Совершенствование конструкции сегментно пальцевых режущих аппаратов // *Вестник НГИЭИ*. 2017. N6 (73). С. 46-52. EDN: YZJEGV.
17. Астафьев В.Л., Ташмухамедов Р.Ф., Живулько У.В. Обоснование параметров хедеров и жаток хедеров к зерноуборочным комбайнам различных классов в режиме неполной загрузки молотилки // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Т. 15. N1. С. 34-40. DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-1-34-40.
18. Козлов С.И., Коцуба В.И., Кузюр В.М., Будко С.И. Повышение производительности и снижение энергоемкости привода режущего аппарата // *Вестник Брянской ГСХА*. 2023. N3 (97). С. 34-40. DOI: 10.52691/2500-2651-2023-97-3-46-51.
19. Сергованцев В.Т. Аналитический подход к автоматизации сельскохозяйственных технологий на примере комбайна // *Вестник МГАУ имени В.П. Горячкина*. 2008. N1 (26). С. 19-22. EDN: ISVULB.

REFERENCES

- Izmaylov A.Yu., Lobachevskiy Ya.P., Dorokhov A.S. et al. Modern agriculture technologies and equipment - trends of the Agritechnika 2019 exhibition. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2020. N6. 28-40 (In Russian). DOI: 10.31992/0321-4443-2020-6-28-40.
- Sharov V.V., Tsench Yu.S. Russia's priorities in the global tractor industry. *Reports of the Timiryazev Academy*. 2019. Iss. 291. Part 2. 446-448 (In Russian). EDN: FJMOLR.
- Lobachevsky Ya.P., Lachuga Yu.F., Izmailov A.Yu., Shogenov Yu.H. Innovative achievements of agricultural engineering scientific institutions in the context of the development of digital systems in agriculture. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2024. N5(323). 2-9 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2024-5-2-8.
- 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 VIESH*. 2018. N4 (33). 150-156 (In Russian). EDN: YTHPID.
- Chaplygin M.E., Starostin I.A., Ovcharenko A.S. Conceptual basis for developing electric plot combine harvester with combined power-generating plant. *Engineering Technologies and Systems*. 2025. N2. 266-283 (In Russian). DOI: 10.15507/2658-4123.035.202502.266-283.
- Chaplygin M.E., Zhalnin E.V. Determining the performance quality of combine harvesters operating. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2019. Vol. 13. N4. 71-76 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2019-13-4-71-76.
- Li W., Zhang K., Lv G. et al. An improved fuzzy logic control method for combine harvester's cleaning system. *Automatic Control and Computer Sciences*. 2022. N56(4). 337-346 (In English). DOI: 10.3103/S0146411622040058.
- Dimitrov V.P., Borisova L.V., Nurutdinova I.N., Papchenko A.A. About the problem of updating adjustable parameters of a rotary combine harvester. *Don Agrarian Science Bulletin*. 2024. N17-2 (66). 4-13 (In Russian). DOI: 10.55618/20756704_2024_17_2_4-13.
- Ozherel'yev V.N., Pogonyshv V.A., Pogonyshva D.A. et al. Issues of operation management of grain harvesters using modeling method. *Vestnik of the Bryansk State Agricultural Academy*. 2025. N2. 62-67 (In Russian). DOI: 10.21515/1990-4665-208-040.
- Smirnov I.G., Khort D.O., Kutuyev A.I. Intelligent technologies and robotic machines for garden crops cultivation. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2021. Vol. 15. N4. 35-41 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-4-35-41.
- Goossens J., Lenaerts B., Devos S. et al. Anomaly detection on the cutter bar of a combine harvester using cyclostationary analysis. *Biosystems Engineering*. 2023. N226. 169-181 (In English). DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2023.01.013.
- Dimitrov V.P., Borisova L.V., Nurutdinova I.N. Method for determining the initial values of the adjustable parameters of the combine harvester cutting unit. *Engineering Technologies and Systems*. 2022. Vol. N32. N4. 552-566 (In Russian). DOI: 10.15507/2658-4123.032.202204.552-566.
- Qin F., Zhao C., Wang Q. et al. Grain combine harvester header profiling control system development and testing. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2024. Vol. 223. 109082 (In English). DOI: 10.1016/j.compag.2024.109082.
- Minin P.S., Lovchikov A.P. To the substantiation of the constructive parameters of the non-supporting cutting device for combine reapers with the forward motion of cutting elements. *Bulletin of Krasnoyarsk State Agrarian University*. 2013. N8(83). 16-167 (In Russian). EDN: RYBWAZ.
- Mikhaltsov E.M., Kem A.A., Damanskiy R.V., Schmidt A.N. On the compliance of the productivity of domestic combine harvesters and the yield of grain and leguminous crops in Russia. *Agricultural Engineering*. 2023. N5(25). 23-28 (In Russian). DOI: 10.26897/2687-1149-2023-5-23-28.
- Aldoshin N.V., Zolotov A.A., Lylin N.A. Improving the design segment-finger cutting machines. *Bulletin of NGIEI*. 2017. N6(73). 46-52 (In Russian). EDN: YZJEGB.
- Astafyev V.L., Tashmukhamedov R.F., Zhivulko U.V. Parameters substantiation of headers and reaper-headers for various classes combine harvesters in the incomplete loading mode of the thresher. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2021. Vol. 15. N1. 34-40 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-1-34-40.
- Kozlov S.I., Kotsuba V.I., Kuzyur V.M., Budko S.I. Performance improvement and reduction energy consumption of the cutting machine drive. *Vestnik of the Bryansk State Agricultural Academy*. 2023. N3. 46-51 (In Russian). DOI: 10.52691/2500-2651-2023-97-3-46-51.
- Sergovantsev V.T. Analytical approach to the automation of agricultural technologies using the combine harvester as an example. *Bulletin of MSAU named after V.P. Goryachkin*. 2008. N1(26). 19-22 (In Russian). EDN: ISVULB.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Чаплыгин М.Е. – научная концепция, формирование выводов; Дмитриев К.С. – определение целей и задач, анализ источников; Овчаренко А.С. – проведение экспериментов, написание статьи. Авторы одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Chaplygin M.E. – scientific concept, formation of conclusions; Dmitriev K.S. – definition of goals and objectives, analysis of sources; Ovcharenko A.S. – conducting experiments, writing an article. 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

10.12.2025

26.02.2026

EDN: RNTVZL

DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-1-31-36



Научная статья

УДК 631.348



Технологические особенности создания отечественного аналога распылителя сельскохозяйственного опрыскивателя

Виктория Эдуардовна Славкина,
младший научный сотрудник,
e-mail: slavkina@vimlab.ru;

Денисов Вячеслав Александрович,
доктор технических наук,
главный научный сотрудник,
e-mail: va.denisov@mail.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. В условиях интенсификации сельского хозяйства особенно важна надежность техники для защиты растений. К уязвимым узлам опрыскивателей относятся распылители. Выход распылителей из строя связан с интенсивным износом форсунок, что приводит к перерасходу рабочей жидкости и экологическим рискам. Возможность получения композита для изготовления отечественных распылителей состоит в повышении износостойкости полиацетала путем введения карбида кремния. (*Цель исследования*) Изучение процесса смешения компонентов композита при плавлении в литьевой машине во время изготовления распылителя сельскохозяйственного опрыскивателя. (*Материалы и методы*) Ранее проведенные работы показали, что использование карбида кремния в качестве дисперсного наполнителя позволяет повысить износостойкость и увеличить срок службы распылителей. В данной работе, посвященной исследованию технологии изготовления распылителя, использована имитация процесса плавления композита полиацеталь-карбид кремния в литьевой машине с помощью синхронного термического анализатора (СТА). Методика опыта включает получение СТА-кривых процесса плавления с последующей обработкой в среде *OriginPro 8* и анализ результатов. (*Результаты и обсуждение*) Предложена методика изучения поведения наполнителя в процессе плавления композита при изготовлении изделия. Наблюдение за изменением хода процесса плавления при вводе наполнителя позволило установить его влияние на технологию изготовления. (*Выводы*) Показано взаимодействие карбида кремния с матрицей полиацетала с точки зрения как влияния наполнителя на сами макромолекулы, так и участия в процессе кристаллизации в качестве зародышей кристаллов. Таким образом установлены особенности технологии изготовления распылителей из композита полиацеталь-карбид кремния.

Ключевые слова: опрыскиватель, распылитель, композит, полиацеталь, карбид кремния, роль наполнителя, качество смешения, плавление полимера.

■ **Для цитирования:** Славкина В.Э., Денисов В.А. Технологические особенности создания отечественного аналога распылителя сельскохозяйственного опрыскивателя // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2026. Т. 20. №1. С. 31-36. DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-1-31-36. EDN: RNTVZL.

Scientific article

Technology for Developing a Domestic Agricultural Sprayer Nozzle

Victoria E. Slavkina,
junior researcher,
e-mail: slavkina@vimlab.ru;

Viacheslav A. Denisov,
Dr.Sc.(Eng.), professor, chief researcher,
e-mail: va.denisov@mail.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. In the context of agricultural intensification, the reliability of plant protection equipment becomes increasingly important. Spray nozzles are among the most vulnerable components of sprayers, as their failure is primarily caused by intensive wear of the orifice. The wear results in excessive consumption of the working fluid and increased environmental risks. One promising approach to improving the wear resistance of domestically produced sprayer nozzles is the development of polyacetal-based composites reinforced with silicon carbide. (*Research purpose*) To investigate the mixing behaviors of composite components during melt processing in an injection molding machine for the manufacture of agricultural sprayer nozzles. (*Materials and methods*) Previous studies have demonstrated that the use of silicon carbide as a dispersed filler increases wear resistance and extends the service life of spray nozzles. In the present study, focusing on the manufacturing technology of sprayer nozzles, the melting behavior of a polyacetal-silicon carbide composite during injection molding was simulated using simultaneous thermal analysis (STA). The experimental procedure involved obtaining STA curves of the melting process, followed by data processing in the *OriginPro 8*

software environment and subsequent analysis of the results. (*Results and discussion*) A methodology for studying filler behavior during composite melting in the manufacturing process is proposed. Analysis of changes in the melting behavior after introduction of the filler made it possible to determine its influence on the processing technology. (*Conclusions*) The interaction between silicon carbide and the polyacetal matrix was demonstrated, both in terms of the filler's effect on polymer macromolecules and its role in the crystallization process as crystal nucleation centers. As a result, specific features of the manufacturing technology for sprayer nozzles made of a polyacetal–silicon carbide composite were identified.

Keywords: sprayer; spray nozzle; composite; polyacetal; silicon carbide; filler role; mixing quality; polymer melting.

For citation: Slavkina V.E., Denisov V.A. Technology for developing a domestic agricultural sprayer nozzle. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2026. Vol. 20. N1. 31-36 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-1-31-36. EDN: RNTVZL.

В сельском хозяйстве к наиболее распространенным способам борьбы с сорной растительностью и вредителями относится внесение средств защиты растений методом опрыскивания [1, 2]. В целях проведения мероприятий по химической защите растений предлагается множество типов опрыскивателей для обработки различных сельскохозяйственных культур.

В современных реалиях надежность сельскохозяйственной техники приобретает первостепенное значение. Простои, вызванные поломками и отказами, приводят к финансовым потерям, нарушению сроков посева и уборки, снижению качества продукции [3, 4]. Разрыв логистических цепочек импорта запасных частей создает сложную ситуацию в области технического сервиса.

Одним из основных компонентов сельскохозяйственных опрыскивателей является распылитель. Главная причина выхода этих деталей из строя заключается в износе форсунки, что вызывает перерасход рабочей жидкости на 30-60% [5], загрязнение окружающей среды и негативное воздействие на живые организмы [6]. Обеспечение высокой износостойкости – обязательное условие надежной и продолжительной работы распылителя, поскольку потеря его функциональности требует замены всего комплекта и приводит к простоям опрыскивателей [7, 8].

Самыми распространенными на сегодняшний день являются распылители из полимерных материалов благодаря их широкому ассортименту и низкой стоимости [9]. В качестве основного компонента этих материалов используется полиацеталь. Он достаточно хорошо поддается обработке, отличается долгим сроком службы и хорошими эксплуатационными характеристиками [10]. Из-за ограничения поставок зарубежного полимерного сырья для деталей, работающих в условиях повышенного износа, актуальным становится создание отечественных материалов с улучшенными триботехническими характеристиками. Эффективное решение этой задачи видится в поиске модификаторов, добавляемых в базовый полимер и позволяющих обе-

спечить высокую надежность запасных частей для распылителей [11, 12].

Проблемы коррозии, абразии и усталости материала стараются решить путем улучшения химической стойкости и механических свойств полимеров [13]. Ранее на базе ФГБНУ ФНАЦ ВИМ проведены исследования [14], направленные на повышение износостойкости распылителей из полиацетала за счет введения дисперсного наполнителя, в качестве которого был выбран карбид кремния (Славкина В.Э., Гончарова Ю.А., Свиридов А.С. Исследование влияния наполнителей на абразивный износ композиционного материала; сб. матер. Международной инновационной конференции молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения. М.: ИМАШ РАН. 2021. С. 257-263).

Такой композиционный материал может использоваться для изготовления распылителя методом литья под давлением. Но в силу высокой прочности и одновременно хрупкости полиацетала процессы, происходящие при литье композита, мало изучены. Более глубокое исследование позволит решить поставленную задачу производства отечественных материалов с улучшенными триботехническими свойствами.

Процесс литья под давлением начинается с плавления и смешения компонентов в зоне загрузки литьевой машины. На этом этапе из-за возможного трения компонентов с поверхностью стенок шнека и материального цилиндра может нарушиться целостность как деталей машины, так и композита.

Цель исследования: изучение процесса смешения компонентов композита повышенной износостойкости при плавлении в литьевой машине для изготовления отечественного аналога щелевого распылителя сельскохозяйственного опрыскивателя *TeeJet 110VP*.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Высокая кристалличность полиацетала придает этому материалу прочность и одновременно хрупкость. Для улучшения свойств полиацетала требуется введение наполнителя. Как отмечено выше, в данном случае наиболее подходящим выбран карбид кремния.

В цикле работ по изучению и изготовлению аналога щелевого распылителя опрыскивателя *TeeJet 110VP* используются полиацеталь марки *MASCON POM 27* (Россия) и карбид кремния «ЖУК-F600» (Россия) с размером частиц 5-10 мкм в концентрации 15% об.

Для исследования процесса плавления композита полиацеталь-карбид кремния в литьевой машине использована имитация с помощью синхронного термического анализатора (СТА) *Jing Yi GAO KE ZCT-1* (Китай). По данным этого прибора получали СТА-кривые и проводили обработку в среде ПО *OriginPro 8*.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Для выяснения роли и поведения наполнителя необходимо изучить кинетику процесса введения его в матрицу и плавления образцов, в частности, характер распределения по толщине ламелей.

Плавление кристаллитов, состоящих из ламелей, и соответственно их образование происходят на зародышах (центрах) кристаллизации. В некоторых случаях именно частицы наполнителя будут играть роль таких центров.

В нашем случае карбид кремния может как про-

никать в межфазные слои, так и располагаться рядом с макромолекулами полимера, играя роль зародышей кристаллизации. Установление поведения карбида кремния и является основной целью данной работы.

В ходе исследований были получены СТА-кривые процессов плавления, переходящих в термоокислительную деструкцию наполненных и ненаполненных образцов (*рис. 1*).

Рассмотрим пики плавления образцов. Ненаполненный образец плавится в интервале температуры 142-178°C. При введении карбида кремния температурный диапазон плавления расширяется до 130-183°C, и увеличиваются затраты энергии. Изменение энергетики, которая определяется количеством теплоты, видно по увеличению интенсивности пика (*рис. 2*).

Для плавления обоих образцов характерно наличие двух последовательных процессов: плавление менее совершенных и тонких ламиллярных кристаллитов и плавление более совершенных и термодинамически устойчивых кристаллитов. В наполненном образце первый процесс протекает быстрее, что связано с формированием большого

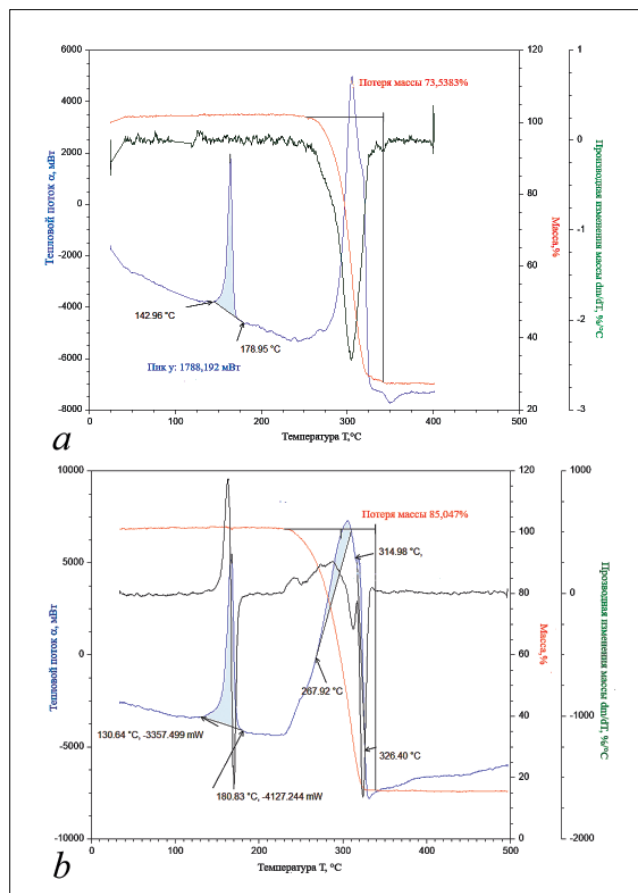


Рис. 1. СТА-кривые образца: *a* – ненаполненного; *b* – наполненного

Fig. 1. Simultaneous thermal analysis (STA) curves of the samples: *a* – unfilled; *b* – filled

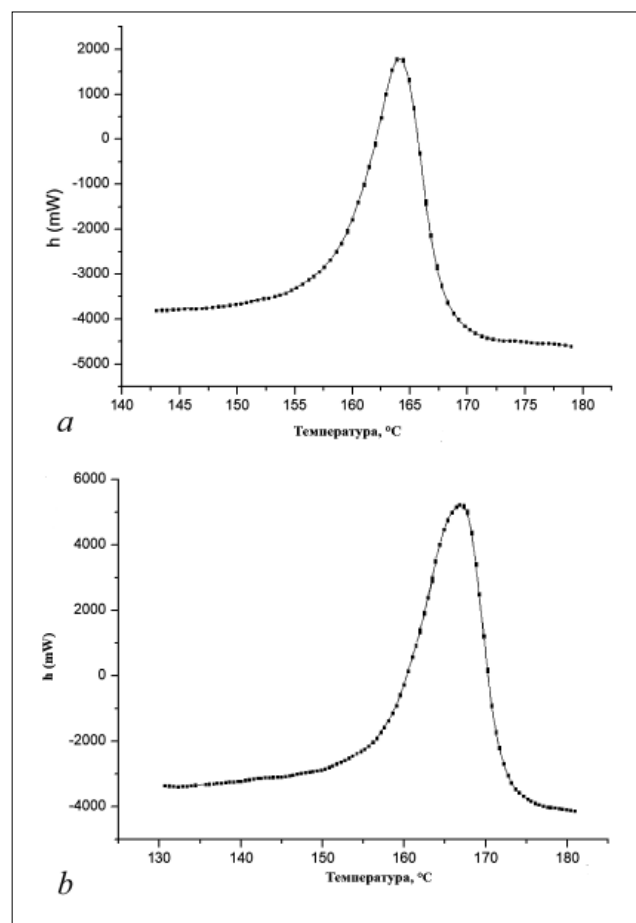


Рис. 2. Пики плавления образца: *a* – ненаполненного; *b* – наполненного

Fig. 2. Melting peaks of samples: *a* – unfilled; *b* – filled

количества мелких и менее совершенных кристаллитов в присутствии частиц карбида кремния, выполняющих функцию центров зародышеобразования. Такой вид пиков процесса плавления указывает на две модификации кристаллитов либо на сложный характер их плавления. Более детально процесс можно оценить по графикам распределения по толщине ламелей. Для их построения необходимо получить значения функции $f(da/dT)$, где a – степень превращения, характеризующая относительную долю кристаллической фазы, перешедшей в расплав при плавлении, которая определяется с помощью дифференцирования площади пика плавления; T – температура процесса (рис. 3).

Плавление ненаполненного образца характеризуется распределением ламелей на восемь групп, а в наполненном образце таких групп девять и более сложная картина. При этом в ненаполненном образце больше высокоплавких кристаллитов и наблюдается процесс передачи валентности при переходе от низко- к высокоплавким кристаллитам. При введении наполнителя увеличивается общее количество и размер кристаллитов (это видно по

толщине и положению линий распределения ламелей).

Введение карбида кремния инициирует перераспределение кристаллитов при плавлении, появление большего количества высокоплавких, но менее крупных кристаллитов. Такой характер процесса плавления указывает на то, что карбид кремния выступает зародышем кристаллизации и при этом проникает внутрь макромолекул полиацетала, выполняя двойную роль.

Таким образом, введение карбида кремния в матрицу полиацетала в процессе получения композитного материала для литья под давлением щелевых распылителей для аналога опрыскивателя TeeJet 110VP определяет хорошее взаимодействие матрицы и наполнителя, но может способствовать диффузии наполнителя на поверхность матрицы. Это в свою очередь вызовет необходимость как защиты матрицы при целевом использовании, так и улучшения ее взаимодействия с наполнителем.

Выводы. Изучение процессов плавления и смешения компонентов композита полиацеталь-карбид кремния показало двойственное поведение карбида кремния в качестве наполнителя. В этой паре матрица-наполнитель достигается сильное взаимодействие, но усложняется процесс плавления (расширение температурного диапазона, изменение хода процесса, перераспределение кристаллитов с изменением их размера и числа), что может стать причиной выхода из строя производственного оборудования. Также возникает необходимость в дополнительной обработке наполнителя, направленной на улучшение его адгезионного взаимодействия с полимерной матрицей и снижение склонности к миграции на поверхность. Такая обработка представляет собой поверхностную модификацию частиц карбида кремния, обеспечивающую более равномерное распределение наполнителя и стабилизацию структуры композита.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке композиционных материалов на основе полиэтилена, наполненных карбидом кремния, предназначенных для эксплуатации в условиях повышенного абразивного воздействия. Установленные особенности формирования структуры композита и распределения кристаллических областей позволяют оптимизировать состав материала и условия его переработки. Это способствует повышению стабильности структуры композита и улучшению его эксплуатационных характеристик.

Дальнейшие исследования планируется направить на изучение влияния поверхностной модификации частиц карбида кремния на адгезионное взаимодействие с полимерной матрицей, а также на исследование влияния концентрации наполнителя на механические и трибологические свойства композиционного материала.

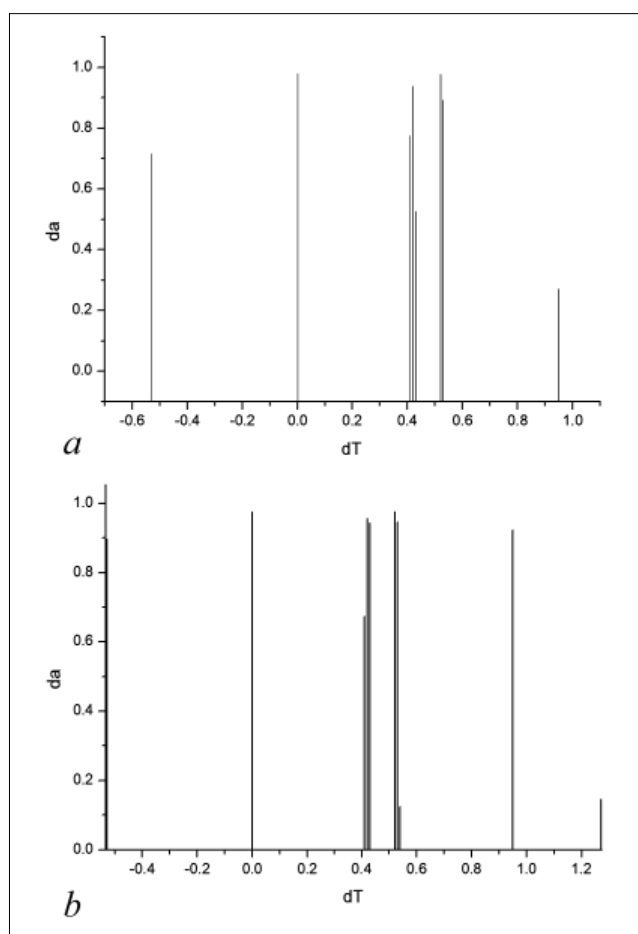


Рис. 3. Распределения по толщине ламелей образца:

a – ненаполненного; *b* – наполненного

Fig. 3. Lamellar thickness distributions: *a* – unfilled sample; *b* – filled sample

Авторы благодарят профессора кафедры химии и технологии переработки эластомеров имени Ф.Ф. Кошелева РТУ МИРЭА Людмилу Сергеевну Шибряеву, младшего научного сотрудника лаборатории 10.3. ФГБНУ ФНАЦ ВИМ Никиту Дмитриевича Блинова за помощь в интерпретации результатов анализа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тавасиев Р.М., Дзиццов А.П., Ахмад А. Определение параметров опрыскивателя для плодопитомников // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т.18. №2. С. 55-60. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-55-60.
2. Ценч Ю.С., Сидоров И.В. Этапы развития технологий и технических средств для внесения удобрений и защиты растений // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т.18. №3. С. 14-22. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-3-14-22.
3. Ветрова С.М., Барчукова А.С., Кривых Н.С. и др. Триботехнические свойства высокопрочной стали в абразивной среде // *Технический сервис машин*. 2025. Т. 63. №2. С. 86-91. DOI: 10.22314/2618-8287-2025-63-2-86-91.
4. Салыков Б.Р., Салыкова О.С., Комаров Д.Н., Мануйлов Н.В. Применение высокопрочных материалов при изготовлении сельскохозяйственной техники. *3i: intellect, idea, innovation-интеллект, идея, инновации*. 2025. №1. С. 194-200. DOI: 10.52269/22266070_2025_1_194.
5. Гуреев И.И., Нуралин Б.Н., Мухтаров М.У., Костюченкова О.Н. Оптимизация параметров адаптивного распылителя сельскохозяйственного опрыскивателя // *Инженерные технологии и системы*. 2024. Т.34. №1. С. 72-87. DOI: 10.15507/2658-4123.034.202401.072-087.
6. Larras F., Charles S., Chaumot A. et al. A critical review of effect modeling for ecological risk assessment of plant protection products. *Environmental Science and Pollution Research International*. 2022. Vol. 29. 43448-43500. DOI: 10.1007/s11356-022-19111-3.
7. Лобачевский Я.П., Миронов Д.А., Миронова А.В. Основные направления повышения ресурса быстроизнашиваемых рабочих органов сельскохозяйственных машин // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. №1. С. 41-50. DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-1-41-50.
8. Ротенберг Ю.Ю., Раскатова Т.В., Редкозубов И.А. Несколько советов по эксплуатации распылителей // *Защита и карантин растений*. 2011. №3. С. 47-49. EDN: NDEFKT.
9. Лысов А.К., Корнилов Т.В. Механизация опрыскивания сельскохозяйственных растений // *Защита и карантин растений*. 2018. №4. С. 38-48. EDN: XNPZBZ.
10. Полянская Е. Распылители: размер имеет значение, высокие технологии на нескольких сантиметрах // *АгроСнабФорум*. 2016. №6(146). С. 24-27. EDN: WZEUCB.
11. Радайкина Е.А., Котин А.В. Исследование триботехнических свойств полиамидных композитов // *Технический сервис машин*. 2023. №1(150). С. 103-109. DOI: 10.22314/2618-8287-2023-61-1-103-109.
12. Миничкина В.П. Импортозамещение: проблемы, результаты и направления развития // *Вестник НИИ гуманитарных наук при Правительстве Республики Мордовия*. 2023. №2(66). С. 25-40. EDN: НКРГМВ.
13. Кудряшова Е.Ю., Задорожный Р.Н. Слоистые полимеры с армирующими волокнами и их триботехнические показатели // *Технический сервис машин*. 2024. Т. 62. №4. С. 77-82. DOI: 10.22314/2618-8287-2024-62-4-77-82.
14. Славкина В.Э., Катаев Ю.В., Свиридов А.С., Загоруйко М.Г. Оценка эффективности применения композита из полиацетата для изготовления щелевых распылителей // *Аграрный научный журнал*. 2024. №4. С. 136-141. DOI: 10.28983/asj.y2024i4pp136-141.

REFERENCES

1. Tavasiev R.M., Dzitsoev A.P., Ahmad A. Determination of sprayer parameters for fruit nurseries. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. №2. 55-60 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-55-60.
2. Tsench Yu.S., Sidorov I.V. Stages of technologies and technical means development for fertilization and plant protection. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol.18 (3). 14-22 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-3-14-22.
3. Vetrova S.M., Barchukova A.S., Krivykh N.S. et al. Tribotechnical properties of high-strength steel in abrasive environment. *Machinery Technical Service*. 2025. Vol. 63. №2. 86-91 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2025-63-2-86-91.
4. Gureev I.I., Nuralin B.N., Mukhtarov M.U., Kostyuchenko O.N. Optimization of parameters of adaptive spray system for agricultural sprayers. *Engineering Technologies and Systems*. 2024. Vol. 34. №1. 72-87 (In Russian). DOI: 10.15507/2658-4123.034.202401.072-087.
5. Salykov B.R., Salykova O.S., Komarov D.N., Manuilov N.V. Application of high-strength materials in the manufacturing of agricultural machinery. *3i: intellect, idea, innovation*. 2025. №1. 194-200 (In Russian). DOI: 10.52269/22266070_2025_1_194.
6. Larras F., Charles S., Chaumot A. et al. A critical review of effect modeling for ecological risk assessment of plant protection products. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022. Vol. 29. 43448-43500 (In English). DOI: 10.1007/s11356-022-19111-3.
7. Lobachevskiy Ya.P., Mironov D.A., Mironova A.V. Increasing

- the operating lifetime of wearable working bodies of agricultural machines. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023. Vol. 17. N1. 41-50 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-1-41-50.
8. Rotenberg Yu.Yu., Raskato T.V., Redkozubov I.A. Some advice on spraying equipment operation. *Plant Protection and Quarantine*. 2011. N3. 47-49 (In Russian). EDN: NDEFKT.
 9. Lysov A.K., Kornilov T.V. Mechanization of spraying agricultural plants. *Plant Protection and Quarantine*. 2018. N4. 38-48 (In Russian). EDN: XNPZBZ.
 10. Polyanskaya E. Sprayers: size matters, high technology in a few centimeters. *AgroSnabForum*. 2016. N6 (146). 24-27 (In Russian). EDN: WZEUCB.
 11. Radaikina E.A., Kotin A.V. Radaykina E.A., Kotin A.V. Study of tribotechnical properties of polyamide composites. *Machinery Technical Service*. 2023. N1(150). 103-109 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2023-61-1-103-109.
 12. Minichkina V.P. Import substitution: issues, results and trends development. *Bulletin of the Research Institute of Humanities by the Government of the Republic of Mordovia*. 2023. N2(66). 25-40 (In Russian). EDN: HKPGMB.
 13. Kudryashova E.Yu., Zadorozhny R.N., Romanov I.V. Layered polymers with reinforcing fibers and their tribotechnical indicators. *Machinery Technical Service*. 2024. Vol. 62. N4. 77-82 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2024-62-4-77-82.
 14. Slavkina V.E., Kataev Yu.V., Sviridov A.S., Zagoruiko M.G. Evaluation of the effect of application of polyacetal composite for manufacturing slot sprayers. *Agricultural Scientific Journal*. 2024. N4. 136-141 (In Russian). DOI: 10.28983/asj.y2024i4pp136-141.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Славкина В.Э. – графическое представление результатов, анализ литературы, проведение и описание результатов исследования, подготовка текста;

Денисов В.А. – постановка задачи, формулирование основной концепции исследования.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Slavkina V. E. — graphical presentation of results; literature review and analysis; analysis and presentation of results; manuscript preparation;

Denisov V. A. — problem statement; development of the core research concept.

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

08.12.2025
25.02.2026

EDN: KVUPDW

DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-1-37-44



Научная статья

УДК 631.171:004



Оптимизация поворота при реверсивном движении автоматизированного машинно-тракторного агрегата

Захид Адыгезалович Годжаев¹,
доктор технических наук, профессор,
член-корреспондент Российской академии наук,
e-mail: fic51@mail.ru;

Сергей Анатольевич Васильев^{2,3},
доктор технических наук, профессор,
e-mail: vsa_21@mail.ru;

Сергей Александрович Мишин²,
ассистент, e-mail: supers.ya@yandex.ru;

Евгений Альбертович Максимов²,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: 89063830541@yandex.ru;

Владимир Петрович Филиппов²,
кандидат физико-математических наук, доцент,
e-mail: filippov_v_p@mail.ru

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

²Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Чувашская Республика, Российская Федерация;

³Нижегородский государственный инженерно-экономический университет, г. Княгинино, Российская Федерация

Реферат. Отметим, что в применении беспилотных технологий важную роль играет планирование пути агрегата. Машинно-тракторные агрегаты (МТА), оснащенные автоматизированными системами управления и навесными сельскохозяйственными машинами, способны выполнять оригинальные способы движения и повороты на поле, в том числе реверсивное движение на склонах. На мелкоконтурных участках процент холостых ходов достаточно велик, и за счет минимизации пути или времени поворота можно увеличить производительность агротехнических приемов. *(Цель исследования)* Рассчитать оптимальный поворот при реверсивном движении автоматизированного машинно-тракторного агрегата. *(Материалы и методы)* Расчет оптимального движения на поворотной полосе для повышения эксплуатационной эффективности МТА является важной частью планирования маршрута. На ограниченном пространстве расчет оптимальной траектории поворота представляет собой сложную задачу динамической нелинейной оптимизации, трудно разрешимую традиционными численными методами. Рассмотрены дифференциальные уравнения Лагранжа второго рода для криволинейного движения МТА в декартовой системе. Однако решения этой системы уравнений, определяющие семейство «игольчатых разворотов» реверсивного движения, будут постоянно ограничены. Для расчета короткого поворота в ограниченных условиях использовался метод оптимизации поворотной полосы. *(Результаты и обсуждение)* Разработаны кинематические модели МТА с роторной косилкой и сформулированы проблемы оптимизации движения на поворотной полосе с учетом эксплуатационных ограничений. Рассмотрены сценарии поворота от симметричного до несимметричного игольчатого и выбран оптимальный. Благодаря интеграции модели МТА в технологический процесс путем оптимизации на сельскохозяйственном участке был получен и рассчитан для заданных условий эксплуатации альтернативный вариант – фасонный поворот с определенными параметрами. *(Выводы)* Аналитические исследования автоматизированного МТА с косилкой показали, что значения эксплуатационных и геометрических показателей для фасонного поворота укладываются в минимальную ширину разворота 3,65 метра и длину пути 7,74 метра (характеристики мини-трактора «Уралец 22» и роторной косилки Н-17). **Ключевые слова:** машинно-тракторный агрегат, движение, оптимизация поворота, реверсивный способ, автоматизация.

■ **Для цитирования:** Годжаев З.А., Васильев С.А., Мишин С.А., Максимов Е.А., Филиппов В.П. Оптимизация поворота при реверсивном движении автоматизированного машинно-тракторного агрегата // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2026. Т. 20. №1. С. 37-44. DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-1-37-44. EDN: KVUPDW.

Scientific article

Optimization of Turning Maneuvers in Reversible Motion of an Automated Agricultural Machine-Tractor Unit

Zakhid A. Godzhaev¹,
Dr.Sc.(Eng.), professor, corresponding member of the
Russian academy of sciences, e-mail: fic51@mail.ru;

Sergey A. Vasiliev^{2,3},
Dr.Sc.(Eng.), head of the department,
e-mail: vsa_21@mail.ru;

Sergey A. Mishin²,
assistant professor of the department,
e-mail: supers.ya@yandex.ru;

Evgeny A. Maximov²,
Ph.D.(Eng.), associate professor,
e-mail: 89063830541@yandex.ru;

Vladimir P. Filippov²,
Ph.D.(Phys.-Math.), associate professor,
e-mail: filippov_v_p@mail.ru;

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

²I.N. Ulianov Chuvash State University, Cheboksary, Chuvash Republic, Russian Federation;

³Nizhny Novgorod State Engineering and Economic University, Knyaginino, Russian Federation

Abstract. Path planning is a crucial component in the application of unmanned agricultural technologies. Machine-tractor units (MTAs) equipped with automated control systems and mounted agricultural implements are capable of executing non-standard motion trajectories and turning maneuvers under field conditions, including reversible motion on sloped terrain. On small-contour plots, the proportion of idle travel is relatively high; therefore, reducing travel distance or turning time can increase the productivity of agrotechnical operations. (*Research purpose*) To calculate the optimal turning maneuver during reversible motion of an automated machine-tractor unit. (*Materials and methods*) The calculation of optimal motion within the turning zone is a key element of route planning aimed at improving the operational efficiency of a machine-tractor unit (MTA). Under constrained headland conditions, optimization of the turning trajectory becomes a complex dynamic nonlinear problem that is difficult to solve using traditional numerical methods. The study considered Lagrange's second-order differential equations describing the curvilinear motion of a machine-tractor unit (MTA) in Cartesian coordinates. However, the solutions of this system of equations, which define a family of "needle turns" for reversible motion, are inherently constrained. Therefore, to compute a short turn under constrained conditions, a turning zone optimization method was used. (*Results and discussion*) The study led to the development of kinematic models of a machine-tractor unit (MTA) equipped with a rotary mower and to the formulation of motion optimization problems within the turning zone under operational constraints. Turning scenarios ranging from symmetric to asymmetric needle turns were evaluated, and the optimal configuration was identified. Integration of the machine-tractor unit (MTA) model into the technological workflow enabled the calculation of an alternative turning option, a shaped turn with specific parameters for the given operating conditions. (*Conclusions*) Analytical studies of the automated agricultural machine-tractor unit (MTA) with a rotary mower demonstrated that the geometric and performance parameters of the shaped turn fall within a minimum turning width of 3.65 meters and a path length of 7.74 meters, corresponding to the technical characteristics of the Uralets 22 mini-tractor and the N-17 rotary mower.

Keywords: machine-tractor unit (MTA), motion, turn optimization, reversible mode, automation.

■ **For citation:** Godzhaev Z.A., Vasiliev S.A., Mishin S.A., Maximov E.A., Filippov V.P. Optimization of turning maneuvers in reversible motion of an automated agricultural machine-tractor unit (MTA). *Agricultural Machinery and Technologies*. 2026. Vol. 20. N1. 37-44 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-1-37-44. EDN: KVUPDW.

Автоматизированное планирование пути прохождения машинно-тракторного агрегата при работе на сельскохозяйственных полях имеет важное значение. Это относится, в частности, к движению на поворотной полосе [1], которое должно выполняться за минимальное время в ограниченных условиях [2]. Управление поворотом может способствовать экономии времени и топлива, а также более высокой эффективности использования поля при запланированной рациональной траектории [3]. В связи с этим оптимизация траектории сельскохозяйственных машин с автоматическими системами управления разворотом на полосе представляет собой актуальный аспект (Годжаев З.А., Шевцов В.Г., Измайлов А.Ю. и др. Концепция создания семейства сельскохозяйственных мобильных энергосредств с комплексами адаптивных машин и агрегатов до 2030 года. М.: ВИМ. 2024. 86 с.).

Из-за сложности модели движения машинно-тракторного агрегата (МТА) алгоритмы линейной оптимизации непригодны для решения данной задачи [4]. Для планирования траектории неголономных мобильных энергетических средств исследовались различные схемы нелинейной оптимизации [5]. В частности, изучались субоптимальные (почти оптимальные) методы, комбинирующие дискретную выборку пространства состояний с последующей численной оптимизацией или сглаживанием траектории; к ним относятся, например, алгоритм частичного сокращения [6] и расширяемый мета-алгоритм [7]. Кроме того, разрабатывались асимптотически оптимальные планировщики. Например, теоретически анализировалась схема планирования и динамического перепланирования на основе выборки [8], а также рассматривались и оценивались методы учета динамических ограничений [9].

В наших исследованиях были предложены оптимизированные перемещения МТА на сельскохозяйственном поле [10, 11]. Для склоновых земель, изрезанных оврагами и балками, установлена возможность сокращения времени выполнения сельскохозяйственных операций до 23% [12].

Задачу численной оптимизации траектории перемещения МТА решают двумя методами: косвенным и прямым [13]. Косвенные методы требуют аналитического вывода необходимых условий оптимальности из вариационного исчисления, что ведет к введению дополнительных (сопряженных) переменных. Однако при их использовании итоговая система, включающая дифференциальные уравнения, граничные условия и ограничения, часто представляет собой сложный математический аппарат.

Прямые решения преобразуют проблему в задачу нелинейного программирования, которая интерпретируется из задачи непрерывного оптимального управления в задачу оптимизации параметров [14, 15]. По сравнению с косвенными методами прямые методы значительно развились, как отмечается в [16], и используются в коммерческих продуктах для управления техникой.

Известно, что на мелкоконтурных участках процент холостых ходов достаточно велик, поэтому можно увеличить эксплуатационную эффективность МТА за счет минимизации времени или пути при повороте [17]. МТА, оснащенные автоматизированными системами управления и навесными сельскохозяйственными машинами, могут выполнять оригинальные способы движения и повороты, в том числе реверсивное движение на склонах (Измайлов А.Ю., Кряжков В.М., Антышев Н.М. и др. Концепция модернизации сельскохозяйственных тракторов и тракторного парка России на период до 2020 года. М.: ВИМ. 2012. 56 с.).

Цель исследований. Рассчитать оптимальный поворот при реверсивном способе движения автоматизированного сельскохозяйственного машинно-тракторного агрегата для повышения эксплуатационной эффективности.

Материалы и методы. Реверсивное движение МТА выполняется преимущественно при механизированных работах в особо сложных условиях, таких как проведение агротехнических и лесовосстановительных операций на склоновых землях и др. Поворот при реверсивном движении на поворотной полосе сельскохозяйственного участка можно представить в виде общей схемы на *рисунке 1*.

В данном случае поворотная полоса расположена между двумя «запрещенными» зонами, за их границы можно принять параллельные прямые линии. Предполагается, что МТА проедет от начальной точки 1 до конечной точки 2, расположенные на нижней граничной линии. В процессе поворота

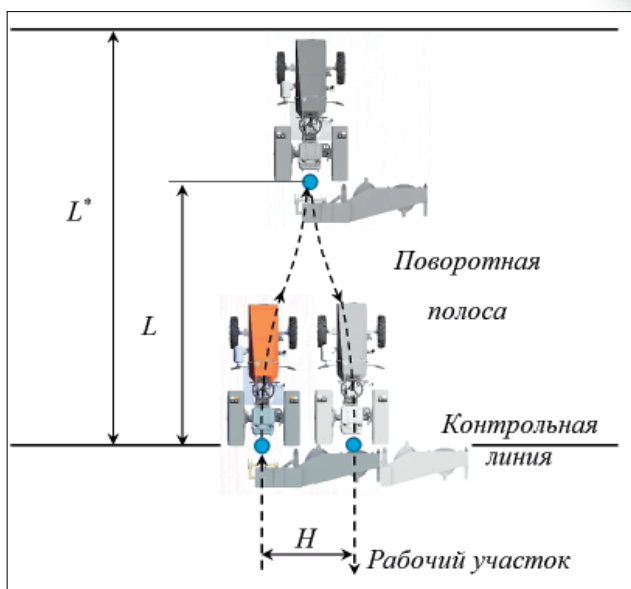


Рис. 1. Схема поворота при реверсивном движении машинно-тракторного агрегата на поворотной полосе
Fig. 1. Kinematic diagram of a reversible turning maneuver of the machine-tractor unit on the headland strip

траектория ограничивается зоной разворота, и въезд МТА в запрещенные зоны недопустим. При таком сценарии цели оптимизации следующие:

- минимальная ширина поворотной полосы L^* ;
- минимальный путь на повороте;
- минимальное время воздействия на рулевое колесо t .

На разворотной полосе МТА обычно движется на относительно низких скоростях, чтобы избежать ситуации недостаточной поворачиваемости. При таком допущении состояние системы будет незначительно изменяться в процессе поворота, поскольку динамика МТА может быть несколько ограничена. В кинематической модели МТА будем предполагать, что шины колес движутся в том направлении, в котором они повернуты. Кроме того, реакция трактора на рулевое управление будет определяться только геометрическими параметрами.

Рассмотрим модель криволинейного движения на разворотной полосе. Используя уравнения Лагранжа второго рода, можно рассмотреть закономерности движения МТА:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = Q_i, \quad (1)$$

где T – кинетическая энергия, Дж; q_i – обобщенные координаты, м; \dot{q}_i – производные от обобщенных координат по времени, м/с; Q_i – обобщенные силы, Н.

Применительно к рассматриваемому случаю криволинейного перемещения целесообразно использовать обобщенные координаты: переменную продольную x , переменную поперечную y , а также

угол расположения продольной оси МТА относительно оси OX . Для криволинейного движения МТА на разворотной полосе уравнения Лагранжа второго рода в декартовой системе координат могут быть записаны в виде системы из трех дифференциальных уравнений второго порядка с тремя неизвестными:

$$\begin{cases}
 m(\ddot{x} + l_1 \cos \beta (\dot{\beta})^2 + l_1 \sin \beta \ddot{\beta}) = \\
 = \sum_{i=1}^2 (P_{ki} - P_{fi}) \cos(\beta + \alpha) + \sum_{i=3}^4 (P_{ki} - P_{fi}) \cos \beta + \\
 + \sum_{i=1}^2 P_{\delta i} \sin(\beta + \alpha) + \sum_{i=3}^4 P_{\delta i} \sin \beta - P_{kp} \cos(\beta - \alpha), \\
 m(\ddot{y} + l_1 \sin \beta (\dot{\beta})^2 - l_1 \cos \beta \ddot{\beta}) = \\
 = \sum_{i=1}^2 (P_{ki} - P_{fi}) \sin(\beta + \alpha) + \sum_{i=3}^4 (P_{ki} - P_{fi}) \sin \beta + \\
 + \sum_{i=1}^2 P_{\delta i} \cos(\beta + \alpha) - \sum_{i=3}^4 P_{\delta i} \cos \beta + P_{kp} \sin(\beta - \alpha), \\
 m(\ddot{x} + l_1 \cos \beta (\dot{\beta})^2 + l_1 \sin \beta \ddot{\beta}) l_1 \sin \beta + \\
 + (\dot{x} + l_1 \sin \beta \dot{\beta}) l_1 \cos \beta (\dot{\beta} - (\beta)^2) + \\
 + m(\ddot{y} + l_1 \sin \beta (\dot{\beta})^2 - l_1 \cos \beta \ddot{\beta}) (-l_1 \cos \beta) + \\
 + (\dot{y} - l_1 \cos \beta \dot{\beta}) l_1 \sin \beta (\dot{\beta} - (\beta)^2) + \\
 + l\ddot{\beta} = \sum_{i=1}^2 l_1 (P_{ki} - P_{fi}) \sin \alpha - \sum_{i=1}^2 l_1 P_{\delta i} \cos \alpha - \\
 - \sum_{i=3}^4 (P_{ki} - P_{fi}) \frac{B_1}{2} - \sum_{i=3}^4 (P_{ki} - P_{fi}) \frac{B}{2} - \\
 - \sum_{i=3}^4 l_2 P_{\delta i} - (l_{kp} + l_2) P_{kp} \sin \gamma - M_c,
 \end{cases} \quad (2)$$

где m – масса МТА, кг; l_1 – расстояние от передней оси до центра тяжести МТА, м; l_2 – расстояние от задней оси до центра тяжести МТА, м; α и β – углы наклона МТА, град; P_{kp} – крюковое усилие, Н; P_f – сила сопротивления качению колес, Н; B – колея колес, м; l_{kp} – расстояние от задней оси до сцепного устройства, м; M_c – момент силы сопротивления повороту, Н/м.

Для нашего случая одним из оптимизируемых параметров при решении системы уравнений (2) будет ширина разворотной полосы. Предлагаемый игольчатый поворот – это обычный вид поворота для реверсивного способа движения, при котором минимальный радиус поворота МТА определяет длину пути. Повышение эффективности использования всей площади сельскохозяйственного участка требует максимального сужения поворотной полосы, а это в свою очередь затрудняет разворот при выходе на следующий гон. Поэтому решения системы (2), определяющие семейство игольчатых разворотов, будут постоянно ограничены.

Основным ограничителем выступает невозможность уменьшить радиус разворота техники, следовательно, увеличить кривизну траектории, что превращает траекторию в набор сопряженных дуг окружности.

Однако, несмотря на жестко заданные пределы изменения значения кривизны траектории МТА, для получения достоверного результата остается

возможность варьировать интервалы, в которых можно «переключить» значение радиуса разворота на противоположное.

Результаты и обсуждение. Поскольку в исследовании выбрана модель для МТА в составе минитрактора «Уралец 224» и роторной косилки Н-17, то приняты фиксированные параметры этих машин. Задача оптимальных временных затрат на повороте эквивалентна задаче о кратчайшей траектории МТА. Так как скорость будем считать постоянной, то угол поворота служит единственным управляющим параметром.

Решим аналитическим методом задачу о кратчайшей траектории при постоянной скорости с использованием геометрического представления поворотов МТА: симметричного, несимметричного и фасонного (фигурного) (рис. 2).

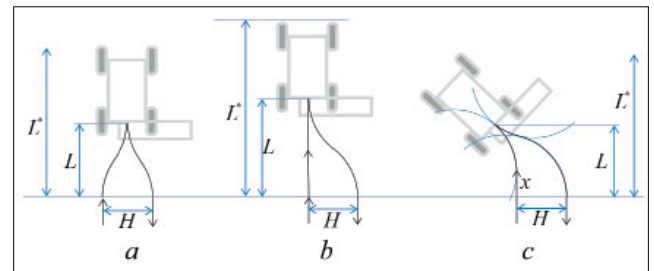


Рис. 2. Схемы игольчатых поворотов при реверсивном движении МТА на поворотной полосе: а – симметричный; б – несимметричный; с – фасонный

Fig. 2. Kinematic diagrams of needle turns for reversible motion of the machine-tractor unit on the headland strip: a – symmetric; b – asymmetric; c – shaped

Минимальный радиус поворота достигается за счет колесной базы и максимального угла поворота управляемых колес трактора:

$$R_{\min} = \frac{l}{\operatorname{tg} \theta}, \quad (3)$$

где l – колесная база трактора, м; θ – максимальный угол поворота управляемых колес трактора, град.

Разобьем траекторию пути в процессе симметричного игольчатого поворота на этапы. Четыре «фазы» можно увидеть на схеме управления углом поворота рулевого колеса (рис. 2а). Трактор вначале поворачивает вправо, затем влево, далее выполняет симметричные действия, совершая поворот в форме иглы, и завершает трек.

Таким образом, траектория поворота состоит из четырех дуг окружности, соответствующих углу γ для минимального радиуса разворота R . Тогда минимальное расстояние от границы разворотной полосы до задней навески трактора будет определяться по выражению:

$$L = 2R \sin \gamma, \quad (4)$$

где L – минимальное расстояние от границы разво-

ротной полосы до задней навески МТА, м; γ – угол, соответствующий дуге, лежащей на окружности минимального радиуса поворота МТА, град.

При этом согласно схемы (рис. 2а) выполняется условие:

$$R(1 - \cos \gamma) = \frac{H}{4}, \quad (5)$$

где H – расстояние между смежными проходами, м.

В итоге получим выражение:

$$L = 2R \sqrt{1 - \left(1 - \frac{H}{4R}\right)^2}. \quad (6)$$

Общая траектория симметричного игольчатого поворота имеет длину

$$S = 4R\gamma. \quad (7)$$

Принимая во внимание геометрические размеры МТА, задаем входящие параметры: минимальный радиус разворота – 4 м, расстояние между смежными проходами с минимальным перекрытием – 1,3 м. По результатам расчета минимальное расстояние от границы разворотной полосы до задней навески трактора при симметричном игольчатом повороте составит 3,16 м, центральный угол – 23°, общая длина пути – 6,49 м.

На второй схеме (рис. 2б) траектория несимметричного поворота состоит из прямой и двух дуг окружности, соответствующих центральному углу γ (во втором случае $\gamma = 33^\circ$). При этом выполняется условие:

$$R(1 - \cos \gamma) = \frac{H}{2}. \quad (8)$$

В итоге получим выражение:

$$L = 2R \sqrt{1 - \left(1 - \frac{H}{2R}\right)^2}. \quad (9)$$

Также принимая во внимание геометрические размеры МТА, получим минимальное расстояние от границы разворотной полосы до задней навески трактора при несимметричном игольчатом повороте, равное 4,37 м, и общую длину пути – 8,97 м.

Рассмотрим далее некоторый частный случай (рис. 2с), когда трактор начинает поворот после того, как проехал по прямой некоторое расстояние x . Общий путь МТА складывается из четырех частей:

$$S = S_1 + S_2 + S_3 + S_4, \quad (10)$$

где S_1 , S_2 , S_3 и S_4 – части пути, определяемые соответственно прямолинейным движением, при повороте налево, при повороте направо и при повороте снова налево, м.

Из расчетной схемы (рис. 3) фасонного игольчатого поворота МТА можем записать:

$$z = \sqrt{x^2 + H^2}, \quad (11)$$

$$h = \sqrt{(2R)^2 - \left(\frac{z}{2}\right)^2}, \quad (12)$$

$$h = \sqrt{4R^2 - \frac{x^2 + H^2}{2}}, \quad (13)$$

$$\sin \delta = \frac{z}{4R}, \quad (14)$$

где x – расстояние, пройденное при прямолинейном движении, м; α и δ – расчетные углы, град.

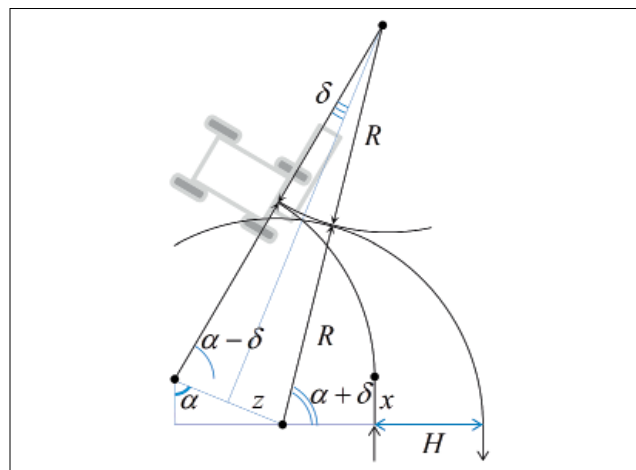


Рис. 3. Расчетная схема фасонного игольчатого поворота МТА на поворотной полосе

Fig. 3. Design diagram of a shaped needle turn of the machine-tractor unit on the headland strip

Найдем выражение для пути фасонного игольчатого поворота на поворотной полосе:

$$S(x) = x + R(\alpha - \delta) + R(2\delta) + R(\alpha + \delta) = x + 2R(\alpha + \delta). \quad (15)$$

После преобразований по формулам (9), (10) и (11) получаем, что общий путь является функцией от x :

$$S(x) = x + 2R \left(\arctg \frac{H}{x} + \arcsin \frac{\sqrt{x^2 + H^2}}{4R} \right). \quad (16)$$

Аналогично по тем же формулам определяем ширину разворотной полосы как функцию от x :

$$L(x) = x + R \sin \left(\arctg \frac{H}{x} - \arcsin \frac{\sqrt{x^2 + H^2}}{4R} \right). \quad (17)$$

Найдем производные от функций $S(x)$ и $L(x)$ по переменной x :

$$S'_x = 1 + 2R \left(-\frac{H}{x^2 + H^2} + \frac{x}{\sqrt{x^2 + H^2} \sqrt{16R^2 - (x^2 + H^2)}} \right), \quad (18)$$

$$L'_x = 1 - R \left(\frac{H}{x^2 + H^2} + \frac{x}{\sqrt{x^2 + H^2} \sqrt{16R^2 - (x^2 + H^2)}} \right) \times \cos \left(\arcsin \frac{\sqrt{x^2 + H^2}}{4R} - \arctg \frac{H}{x} \right). \quad (19)$$

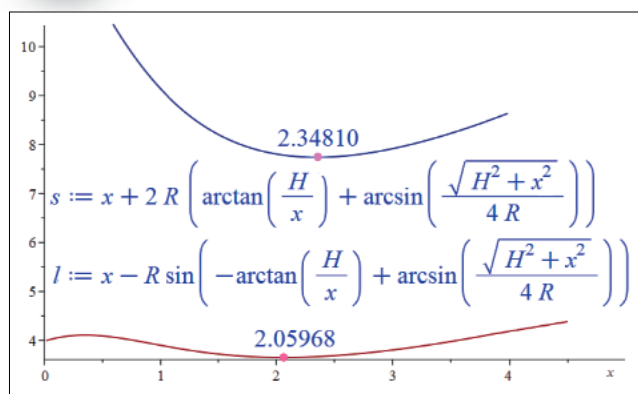


Рис. 4. Графики функций $S(x)$ и $L(x)$
 Fig. 4. Graphs of $S(x)$ and $L(x)$ functions

Приравниваем выражения (18) и (19) к нулю для нахождения экстремальных точек. Графики функций $S(x)$ и $L(x)$ с найденными точками минимумов представлены на рисунке 4.

Таким образом, анализ функций на экстремум показывает, что они обе имеют минимумы (причем различные), которые численно определяется при подстановке реальных значений $H = 1,3$ м и $R = 4$ м, соответствующих рассматриваемому случаю.

В итоге минимальное значение пути на разворотной полосе $S(2,35) \approx 7,74$ м; разворотная полоса $L(2,35) \approx 3,67$ м. Если же минимизируется не путь, а ширина разворотной полосы, то $S(2,06) \approx 7,78$ м; разворотная полоса $L(2,06) \approx 3,65$ м. В данном случае различия практически несущественные и расстояние x , пройденное при прямолинейном движении, может быть выбрано из интервала 2,06-2,35 м.

Рассмотрение вопросов оптимизации процессов управления МТА позволит решать проблемы формирования парка сельскохозяйственных тракторов [17, 18] и повысить уровень интеллектуальных технологий точного земледелия [19, 20].

Выводы. Исследована возможность использования методов оптимизации для решения задачи короткого поворота в ограниченных условиях поворотной полосы. Рассмотрены дифференциальные уравнения Лагранжа второго рода для криволинейного движения МТА на разворотной полосе в декартовой системе. Разработаны кинематические модели МТА с роторной косилкой и сформулированы проблемы оптимизации поворота на поворотной полосе путем включения его модели и учета эксплуатационных ограничений. Рассмотрены сценарии поворота на поворотной полосе при реверсивном движении – от симметричного до несимметричного игольчатого поворота и выбран оптимальный способ для МТА с роторной косилкой.

Интеграция модели МТА и реализация процесса оптимизации на сельскохозяйственном участке позволили получить альтернативный вариант – фасонный поворот с определенными параметрами при заданных условиях эксплуатации. Аналитические исследования автоматизированного сельскохозяйственного МТА с косилкой (приняты характеристики мини-трактора «Уралец 224» и роторной косилки Н-17) показали, что значения эксплуатационных и геометрических показателей для фасонного поворота укладываются в минимальную ширину разворота, равную 3,65 м и длину пути – 7,74 м.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Tu X., Tang L. Headland turning optimisation for agricultural vehicles and those with towed implements. *Journal of Agriculture and Food Research*. 2019. 1. 100009. DOI: 10.1016/j.jafr.2019.100009.
- Ненайденко А.С., Поддубный В.И., Валекжанин А.И. Моделирование управления движением колесной сельскохозяйственной машины в режиме реального времени // *Тракторы и сельхозмашины*. 2018. N3. С. 32-38. EDN: XSEMKD.
- Годжаев З.А., Гришин А.П., Гришин А.А., Гришин В.А. Беспилотное мобильное энергосредство сельскохозяйственного назначения // *Тракторы и сельхозмашины*. 2016. N10. С. 41-44. EDN: WWHVXJ.
- Oksanen T., Visala A. Optimal control of tractor-trailer system in headlands. *ASABE Paper*. N701P1004. MI. 2004. DOI: 10.13031/2013.17842.
- 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/vrsn/2019/4/63-68.
- Geraerts R., Overmars M. Creating high-quality paths for motion planning. *International Journal of Robotics Research*. 2007. N26. 845. DOI: 10.1177/0278364907079280.
- Luna R., Sucas I., Moll M., Kavrakli L. Anytime solution optimization for sampling-based motion planning. *Proc. 2013 IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation*. 2013. 5068-5074. DOI: 10.1109/ICRA.2013.6631301.
- Otte M., Frazzoli E. RRTX: asymptotically optimal single-query sampling-based motion planning with quick replanning. *International Journal of Robotics Research*. 2016. N35(7). 797-822. DOI: 10.1177/0278364915594679.
- Cariou C., Gobor Z., Seifert B., Berducot M. Mobile robot trajectory planning under kinematic and dynamic constraints for partial and full field coverage. *Journal of Field Robotics*. 2016. N34 (7). 1297-1312 (2017). DOI: 10.1002/rob.21707.
- Васильев С.А., Васильев А.А., Затылков Н.И. Противозероизонная контурная обработка почвы машинно-тракторными агрегатами на агроландшафтах склоновых земель // *Вестник НГИЭИ*. 2018. N5 (84). С. 43-54. EDN: XNDFZR.
- Ахалая Б.Х., Ценч Ю.С., Беляева Н.И. Автоматизиро-

- ванная почвообрабатывающая машина для послышной 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.
12. Васильев С.А., Лопоткин А.М., Васильев А.А. Разработка математической модели технологического процесса обработки склоновых земель противозерозионным орудием // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование*. 2021. N4 (64). С. 334-344. DOI: 10.32786/2071-9485-2021-04-34.
 13. Conway B.A. A survey of methods available for the numerical optimization of continuous dynamic systems. *Journal of optimization theory and applications*. 2012. 152 (2). 271-306. DOI: 10.1007/s10957-011-9918-z.
 14. Fahroo F., Ross I.M. Direct trajectory optimization by a Chebyshev pseudospectral method. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*. 2002. 25 (1). 160-166. DOI: 10.2514/2.4862.
 15. Коротченя В.М., Ценч Ю.С., Лобачевский Я.П. Система машин как фактор научно-технического прогресса в агропромышленном комплексе // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2024. N4. С. 67-72. DOI: 10.31857/S250026272404012.
 16. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Хорошенков В.К. и др. Оптимизация управления технологическими процессами в растениеводстве // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. N3. С. 4-11. DOI: 10.22314/2073-7599-2018-12-3-4-11.
 17. Кряжков В.М., Годжаев З.А., Шевцов В.Г. и др. Проблемы формирования инновационного парка сельскохозяйственных тракторов России // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2015. N3. С. 9-14. EDN: TTLVRR.
 18. Лачуга Ю.Ф., Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П. и др. Приоритетные направления научно-технического развития отечественного тракторостроения // *Техника и оборудование для села*. 2021. № 2 (284). С. 2-7. DOI: 10.33267/2072-9642-2021-2-2-7.
 19. Ценч Ю.С., Косенко В.В., Шаров В.В. Эволюция конструкций гусеничных тракторов общего назначения // *Тракторы и сельхозмашины*. 2022. Т. 89. Т. 3. С. 155-166. DOI: 10.17816/0321-4443-109676.
 20. Васильев С.А. Интеллектуальная технология контроля качества обработки почвы в системе точного земледелия // *Земледелие*. 2022. N3. С. 36-41. EDN: ZGGQUG.

REFERENCES

1. Tu X., Tang L. Headland turning optimisation for agricultural vehicles and those with towed implements. *Journal of Agriculture and Food Research*. 1, 2019, 100009 (In English). DOI: 10.1016/j.jafr.2019.100009.
2. Nenajdenko A.S., Poddubnyj V.I., Valekzhanin A.I. Modeling the movement control of a wheeled agricultural machine in real time. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2018. N3. 32-38 (In Russian). EDN: XSEMKD.
3. Godzhaev Z.A., Grishin A.P., Grishin A.A., Grishin V.A. Unmanned mobile power unit for agricultural purposes. *Tractors and agricultural machinery*. 2016. N10. 41-44 (In Russian). EDN: WWHVXJ.
4. Oksanen T., Visala A. Optimal control of tractor-trailer system in headlands. *ASABE Paper N701P1004*. 2004 (In English). DOI: 10.13031/2013.17842.
5. 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.
6. Geraerts R., Overmars M. Creating high-quality paths for motion planning. *International Journal of Robotics Research*. 2007. N26. 845 (In English). DOI: 10.1177/0278364907079280.
7. Luna R., Sucan I., Moll M., Kavraki L. Anytime solution optimization for sampling-based motion planning. *Proc. 2013 IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation*. 2013. 5068-5074 (In English). DOI: 10.1109/ICRA.2013.6631301.
8. Otte M., Frazzoli E. RRTX: asymptotically optimal single-query sampling-based motion planning with quick replanning. *International Journal of Robotics Research*. 2016. N35(7). 797-822 (In English). DOI: 10.1177/0278364915594679.
9. Cariou C., Gobor Z., Seiferth B., Berducat M. Mobile robot trajectory planning under kinematic and dynamic constraints for partial and full field coverage. *Journal of Field Robotics*. 2016. N34 (7). 1297-1312 (In English). DOI: 10.1002/rob.21707.
10. Vasilyev S.A., Vasilyev A.A., Zatytkov N.I. Anti-erosion contour tillage machine-tractor units on the agricultural landscapes of sloping land. *Vestnik NGIEI*. 2018. N5 (84). 43-54 (In Russian). EDN: XNDFZR.
11. 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.
12. Vasiliev S.A., Lopotkin A.M., Vasiliev A.A. Development of a mathematical model of the technological process of processing slope lands with an anti-erosion weapon. *Proceedings of the Nizhnevolszhsy Agrouniversity complex: Science and higher professional education*. 2021. N4 (64). 334-344 (In Russian). DOI: 10.32786/2071-9485-2021-04-34.
13. Conway B.A. A survey of methods available for the numerical optimization of continuous dynamic systems. *Journal of Optimization Theory and Applications*. 2012. 152 (2). 271-306 (In English). DOI: 10.1007/s10957-011-9918-z.
14. Fahroo F., Ross I.M. Direct trajectory optimization by a Chebyshev pseudospectral method. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*. 2002. 25 (1). 160-166 (In English). DOI: 10.2514/2.4862.

15. Korotchenya V.M., Tsench Yu.S., Lobachevsky Ya.P. The machine system as a factor of scientific and technological progress in agro-industrial complex. *Russian Agricultural Sciences*. 2024. N4. 67-72 (In Russian). DOI: 10.31857/S250026272404012.
16. Izmailov A.Yu., Lobachevsky Ya.P., Khoroshenkov V.K. et al. Optimization of technological process control in crop production. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2018. Vol. 12. N3. 4-11 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2018-12-3-4-11.
17. Kryazhkov V.M., Gojaev Z.A., Shevtsov V.G. et al. Problems of formation of Russian innovative agricultural tractors fleet. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2015. N3. 9-14 (In Russian). EDN: TTLVRR.
18. Lachuga Yu.F., Izmailov 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.
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. Vasiliev S.A. Intelligent technology for quality control of soil tillage in the precision farming system. *Agriculture*. 2022. N3. 36-41 (In Russian). EDN: ZGGQUG.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Годжаев З.А. – постановка задачи, обоснование математических моделей и технических средств;

Васильев С.А. – формулирование основной концепции исследования;

Мишин С.А. – графическое представление результатов, анализ литературы, описание результатов исследования;

Максимов Е.А. – оптимизация математических моделей, подготовка текста, формирование выводов;

Филлипов В.П. – разработка методологии и формирование выводов исследования.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Godzhaev Z.A. – problem statement, substantiation of mathematical models and technical means;

Vasiliev S.A. – formulation of the basic concept of the study, development of research methodology, formation of conclusions;

Mishin S.A. – graphical representation of the results, description of the results and formation of conclusions of the study;

Maximov E.A. – optimization of mathematical models, text preparation, drawing conclusions;

Fillipov V.P. – development of methodology and formation of research 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

01.12.2025
20.02.2026

EDN: APOOJY

DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-1-45-51



Научная статья

УДК 631.35



Определение динамических нагрузок машин для подготовки почвы под посадку картофеля

Набижон Гуломович Байбобоев¹,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: ngbayboboev@gmail.com;

Парвиз Имранович Гаджиев²,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: pgadjiev@yandex.ru;

Гюльбике Гудретдиновна Рамазанова²,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: gulbike@yandex.ru;

Гайрат Атаханович Бахадиров³,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: instmech@rambler.ru;
Журабек Умирзокович Умирзоков¹,
докторант,
e-mail: jurabek97u@mail.ru

¹Наманганский государственный технический университет, г. Наманган, Республика Узбекистан;

²Российский государственный университет народного хозяйства имени В.И. Вернадского, г. Балашиха, Российская Федерация;

³Институт механики и сейсмостойкости сооружений имени М.Т. Уразбаева, г. Ташкент, Республика Узбекистан

Реферат. Подготовка почвы перед посадкой составляет ключевой этап возделывания картофеля. Применение рыхлительного барабана машины-сепаратора приводит к снижению повреждения клубней при уборке. Рассмотрен экспериментальный подход к изучению характера собственных частот колебаний рыхлительного барабана на примере машины-сепаратора в эксплуатационных условиях. (*Цель исследования*) Исследовать закономерности изменения динамических нагрузок рабочих органов почвообрабатывающих машин методом тензометрирования и осциллографирования колебательных процессов вращающихся звеньев сепаратора-отделителя комков почвы. (*Материалы и методы*) Для определения частот собственных колебаний комкоразрушающих рабочих органов машины-сепаратора использовали метод инерционного возбуждения. В лабораторных условиях был изготовлен специальный стенд, состоящий из электродвигателя постоянного тока типа МПП-35, выпрямителя с реостатом и тензометрической балки. Во время эксперимента для определения собственной частоты рыхлительного барабана на жестко закрепленном на валу барабана кронштейну был установлен вибратор. Приведенная схема тензометрирования вращающихся узлов сепаратора-отделителя комков почвы позволяет проводить измерения с минимальной погрешностью. Колебания узла регистрировались с использованием тензометрической балки в виде консольной пластинки из пружинистой стали, на боковые поверхности которой наклеены два тензорезистора с базой 20 миллиметров и сопротивлением каждого 200 Ом. (*Результаты и обсуждение*) При определении частоты собственных колебаний рыхлительного барабана вибратор крепился к звездочке $z = 40$ привода барабана. А при определении частоты собственных колебаний первого и второго валов сепарирующего транспортера вибратор крепился к звездочке $z = 13$ привода транспортеров. Тензорезисторы воспринимали деформацию изгиба пластинки, электрические сигналы поступали к усилителю и гальванометру осциллографа с непрерывной записью осциллограмм, возбуждаемых электродвигателем крутильных колебаний. (*Выводы*) Экспериментально установлено, что графики крутильных колебаний на узле ведущего и ведомого вала элеватора и рыхлительного барабана представляют синусоиду с периодом $T = 0,053$ секунды. **Ключевые слова:** механическая обработка почвы, возделывание картофеля, сепарация почвы, комки, агротехнические приемы, сепаратор, элеватор.

■ Для цитирования: Байбобоев Н.Г., Гаджиев П.И., Рамазанова Г.Г., Бахадиров Г.А., Умирзоков Ж.У. Определение динамических нагрузок машин для подготовки почвы под посадку картофеля // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2026. Т. 20. №1. С. 45-51. DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-1-45-51. EDN: APOOJY.

Scientific article

Determination of Dynamic Loads on Soil-Preparation Machines Used for Potato Planting

Nabijon G. Bayboboev¹,
Dr.Sc.(Eng.), professor,
e-mail: ngbayboboev@gmail.com;

Parviz I. Gadzhiev²,
Dr.Sc.(Eng.), professor,
e-mail: pgadjiev@yandex.ru;

Gulbike G. Ramazanova²,
Ph.D.(Eng.), associate professor,
e-mail: gulbike@yandex.ru;

Gayrat A. Bahadirov³,
Dr.Sc.(Eng.), professor,
e-mail: instmech@rambler.ru;

Jurabek U. Umirzokov¹,
Ph.D.(Eng.) student,
e-mail: jurabek97u@mail.ru

¹Namangan State Technical University, Namangan, Uzbekistan Republic;

²Vernadsky Russian State University of National Economy, Balashiha, Russian Federation;

³Institute of Mechanics and Seismic Stability of Structures named after M.T. Urazbaev, Tashkent, Uzbekistan Republic

Abstract. Soil preparation prior to planting is a key stage in potato cultivation. The incorporation of a loosening drum into a soil-separating machine helps reduce tuber damage during harvesting. This study presents an experimental approach to investigating the natural oscillation frequencies of the loosening drum, using a soil separator under real working conditions. (*Research purpose*) To identify the patterns governing changes in dynamic loads acting on the working elements of soil-cultivating machines by means of strain-gauge measurements and oscillographic analysis of vibrational processes in the rotating components of a soil clod separator. (*Materials and methods*) To determine the natural oscillation frequencies of the clod-breaking working tools of the separator machine, the method of inertial excitation was used. A special laboratory test rig was constructed, consisting of an MGP-35 type direct current motor, a rectifier equipped with a rheostat, and a strain-gauge beam. During the experiment, a vibrator was mounted on a bracket rigidly fixed to the shaft of the soil loosening drum to identify its natural frequency. The adopted strain-gauge measurement scheme for the rotating units of the soil clod separator ensures high measurement accuracy. Oscillatory responses were recorded using a strain-gauge beam made of spring steel and shaped as a cantilever plate. Two strain gauges with a gauge length of 20 mm and a nominal resistance of 200 Ohms each were bonded to the lateral surfaces of the beam to register deformation caused by vibrational loading. (*Results and discussion*) To determine the natural frequency of the loosening drum, the vibrator was mounted on a drive sprocket with $z = 40$. The natural frequencies of the first and second shafts of the separating conveyor were determined in a similar manner, with the vibrator mounted on a drive sprocket with $z = 13$. The strain gauges registered bending deformation of the plate, while the resulting electrical signals were transmitted to an amplifier and subsequently to the oscilloscope galvanometer, which provided continuous recording of oscillograms of torsional vibrations excited by the electric motor. (*Conclusions*) The experimental results demonstrated that the torsional vibration waveforms of the drive and driven shafts of the elevator, as well as of the loosening drum, exhibit a sinusoidal character with a vibration period of $T=0.053$ seconds. **Keywords:** mechanical soil tillage, potatoes, soil clod separation, clods, agrotechnical operations, separator, elevator.

■ **For citation:** Bayboboev N.G., Gadzhiev P.I., Ramazanova G.G., Bahadirov G.A., Umirzokov J.U. Determination of dynamic loads on soil-preparation machines used for potato planting. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2026. Vol. 20. N1. 45-51 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-1-45-51. EDN: APOOJY.

Возможность повышения эффективности производства и улучшения качества картофеля заключается в широкой модернизации технологии возделывания и совершенствования конструкторских разработок машин для предпосадочной подготовки почвы [1]. Основным рабочим органом машины для обработки почвы под посадку картофеля служит барабан с шарнирно закрепленными колками. При этом шарнирная подвеска сохраняет рабочие органы машины от поломок во время удара о прочные комки и камни. Наличие комкоразрушающего рабочего органа способствует разрыхлению почвы [2, 3].

Работа агрегата основана на растяжении образца под воздействием нагрузки, которая с течением времени увеличивается [4]. В данном случае нагрузка направлена на разрушение соединения композитных прутков с металлической трубкой, что позволяет определить прочность этого соединения, установить возможность его функционирования в

полевых условиях и допустимые нагрузки, возникающие в процессе уборки картофеля [5].

Недостаточное количества экспериментальных данных о статистической и динамической нагруженности рабочих органов барабанного типа осложняет усовершенствование почвообрабатывающих машин [6, 7].

Поскольку анализ влияния неравномерного поступления обрабатываемой массы на динамику барабанов с различными моментами инерции масс проводился без учета конструктивных особенностей барабана, то остались не изученными закономерности динамических нагрузок на его опору и валы [8, 9]. Исследование колебательного процесса рабочих органов барабанного типа должно быть направлено на обеспечение динамической прочности их конструктивных параметров [10, 11].

В оценке значимости барабанов машин для подготовки почвы также важно исходить из концепции, что эти барабаны являются носителями энер-

гии, что позволяет разрушать комки почвы свободным ударом [12]. В машинах для подготовки почвы под посадку картофеля используются ножи, битерные барабаны с различными видоизменениями [13, 14]. От их надежного функционирования зависят нормальное протекание технологического процесса разрушения комков почвы и общая производительность машины в целом [15, 16].

Для изучения динамики процессов, выполняемых комкоразрушающими рабочими органами машины, важной задачей является экспериментальное исследование колебания этих рабочих органов (Рустамов Р.М. Динамика рыхлительного барабана сепаратора почвы на базе картофелекопателя КТН-2В: дисс. ... канд. техн. наук Наманган, 1994. 138 с.).

Цель исследования – изучить закономерности изменения динамических нагрузок рабочих органов почвообрабатывающих машин методом тензометрирования и осциллографирования колебательных процессов.

Материалы и методы. Частоту собственных колебаний комкоразрушающих рабочих органов машины-сепаратора определяли методом инерционного возбуждения [17, 18]. Анализ схемы подвода и распределения потока энергии к вращающимся узлам машины для обеспечения рабочего процесса при подготовке почвы показал, что битерный барабан является одним из наиболее нагруженных (Сорокин А.А., Бойбобоев Н.Г., Рустамов Р.М. Аналитическое исследование крутильных колебаний вращающихся звеньев картофелекопателя-сепаратора для обработки почвы перед посадкой картофеля // Библиографический указ. ВИНТИ-Деп научные работы. 1994. №1. С. 51). Этим барабаном распределяется поток энергии между остальными рабочими барабанами и вращающимися деталями. Например, одна из ведомых звездочек битерного барабана установлена на его несущем валу рядом с ведущей звездочкой. Через эту звездочку приводится во вращение барабан с подвижными битерами. В результате на опоры битерного барабана действуют составляющие собственной массы барабана, сил инерции от неуравновешенности, комплектующих барабан масс, технологической нагрузки и нагрузки от ведущей и ведомых ветвей цепных приводов. Значения крутящего момента ведущей звездочки битерного барабана определяются выполняемыми самим барабаном операциями и нагрузками на другие рабочие барабаны, приводимые в движение ведомыми звездочками барабана.

Исследования в эксплуатационных условиях проводились при заглублении битера барабана в массу на $10 \pm 0,3$ см, что соответствует установке этих барабанов в практике эксплуатации. В лабораторных условиях изготовлен стенд, состоящий

из электродвигателя постоянного тока типа МГП-35, выпрямителя с реостатом и тензометрической балкой. При плавном изменении сопротивления реостата пропорционально меняется напряжение, и в зависимости от него плавно регулируется частота вращения электродвигателя. На консольной части вала электродвигателя закреплена масса m , эксцентрично расположенная относительно оси вращения. При вращении электродвигателя масса возбуждается и колеблется с частотой, равной угловой скорости вращения вала электродвигателя ω_n .

Для определения собственной частоты рыхлительного барабана во время эксперимента на жестко закрепленном к валу барабана кронштейне был установлен вибратор.

Анализируя приведенные выражения радиальных нагрузок на опоры, можно отметить, что на изменение значений амплитуд радиальных нагрузок наибольшее влияние оказывают низкочастотные гармонические составляющие (первая, вторая и третья) [19, 20]. Для снижения амплитуд радиальных нагрузок, способствующих улучшению динамических условий работы опор барабана, нами рекомендуется устанавливать упругие прокладки между корпусами подшипников и рамой машины взамен жестких металлических, используемых в серийных машинах. Кроме того, как показывают расчеты, выполненные по известной методике, для повышения надежности работы опор барабана рекомендуется внутренние и наружные кольца подшипников устанавливать соответственно по посадкам к6 и Н7.

Технологические нагрузки подвижного битерного барабана от набрасываемого на него битерным барабаном массы являются равномерно-распределенными по его длине, и эти нагрузки периодически повторяются за каждый оборот барабана. Кривые радиальных нагрузок (Н) на опоры в этом случае целесообразно представить в виде гармонических составляющих, которые могут быть описаны приближенными выражениями:

$$R_{н1} \approx 268 + 248 \sin(\omega t - 152^\circ) + 76 \sin(2\omega t - 135^\circ) + 90,4 \sin(3\omega t - 148^\circ) + 10,8 \sin(4\omega t - 300^\circ) + 5 \sin(5\omega t - 98^\circ) + 161 \sin(6\omega t - 186^\circ)$$

$$R_{н2} \approx -290 + 357 \sin(\omega t - 168^\circ) + 398 \sin(2\omega t - 172^\circ) + 113 \sin(3\omega t - 88^\circ) + 54,3 \sin(4\omega t - 115^\circ) + 134 \sin(5\omega t - 108^\circ) + 72,6 \sin(6\omega t - 186^\circ)$$

$$R_{н3} \approx 60 + 229 \sin(\omega t + 13^\circ) + 37,6 \sin(2\omega t - 77^\circ) + 134 \sin(3\omega t - 104^\circ) + 11,2 \sin(4\omega t - 26^\circ) + 7,2 \sin(5\omega t - 154^\circ) + 42 \sin(6\omega t - 326^\circ)$$

$$R_{н4} \approx 50 + 188,5 \sin(\omega t + 164^\circ) + 87,5 \sin(2\omega t + 275^\circ) + 25,6 \sin(3\omega t + 54^\circ) - 55,5 \sin(4\omega t - 148^\circ) + 50,2 \sin(5\omega t + 41^\circ) + 31 \sin(6\omega t - 96^\circ)$$

где $\omega = 35,5 \pm 0,2$ – угловая скорость вращения барабана, с^{-1} .

Регистрацию колебаний узла осуществляли тензометрической балкой, представляющей собой консольную пластинку из пружинистой стали, на боковые поверхности которой наклеены два тензорезистора с базой 20 мм и сопротивлением по 200 Ом каждый. Тензорезисторы соединялись в полумосты и подключались к одному из каналов полупроводникового усилителя ТУП-12М. Усиленные сигналы фиксировались с помощью осциллографа Н-010М. Схема электротензометрирования представлена на *рисунке 1*.

Консольная часть тензометрической балки вставлялась в паз кронштейна на некотором расстоянии со стороны, противоположной установке электродвигателя. Противоположная часть тензометрической балки жестко закреплялась на раме машины.

Перед определением парциальных частот рыхлительного барабана его концевые точки жестко прикреплялись к корпусу машины. К входной части, где был установлен электродвигатель, прикладывался постоянный крутящий момент, величина которого приблизительно равна статической составляющей этого момента, действующего при работе машины сепаратора.

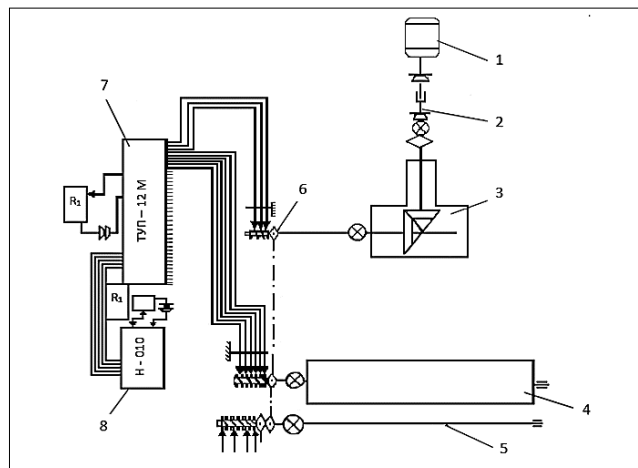


Рис. 1. Схема тензометрирования вращающихся узлов сепаратора почвы: 1 – электродвигатель; 2 – карданный вал; 3 – редуктор; 4 – рыхлительный барабан; 5 – вал сепарирующего транспортера; 6 – цепная передача; 7 – усилитель ТУП – 12 М; 8 – осциллограф Н – 010 М
 Fig. 1. Diagram illustrating strain-gauge instrumentation for the rotating units of the soil separator: 1 – electric motor; 2 – cardan shaft; 3 – gearbox; 4 – loosening drum; 5 – shaft of the separating conveyor; 6 – chain drive; 7 – TUP-12M amplifier; 8 – N-010M oscilloscope

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. За время определения парциальных частот рыхлительного барабана угловая скорость вращения вала электродвигателя плавно увеличивалась от 0 до 250 с^{-1} .

При этом тензорезисторы воспринимали деформацию изгиба пластинки, электрические сигналы

от которых поступали к усилителю и гальванометру осциллографа, с помощью которого осуществлялась непрерывная запись осциллограмм, возбуждаемых электродвигателем крутильных колебаний. При совпадении числового значения угловой скорости вала электродвигателя со значением парциальной частоты рассматриваемого рыхлительного барабана на осциллограмме четко просматривается зона увеличения амплитуды колебаний. По значению периода этого колебания на осциллограмме определяют парциальную частоту колебаний рассматриваемого рабочего органа.

Например, крутящий момент между ведущей и ведомой звездочками колеблется в пределах $72 \pm 1,3$ и $18 \pm 1,3 \text{ Н}\cdot\text{м}$, а между правой опорой и правым крайним фланцем $13 \pm 1,3$ и $166 \pm 1,3 \text{ Н}\cdot\text{м}$ и т.п. Поскольку длина концевых участков небольшая (до 95 мм) и она не может выравнять знакопеременный характер крутящего момента, то случаи среза несущего вала и выхода из строя шпоночных соединений звездочек на этих участках вполне объяснимы.

Осциллограмма колебательного процесса вращающихся звеньев машины-сепаратора показана на *рисунке 2*.

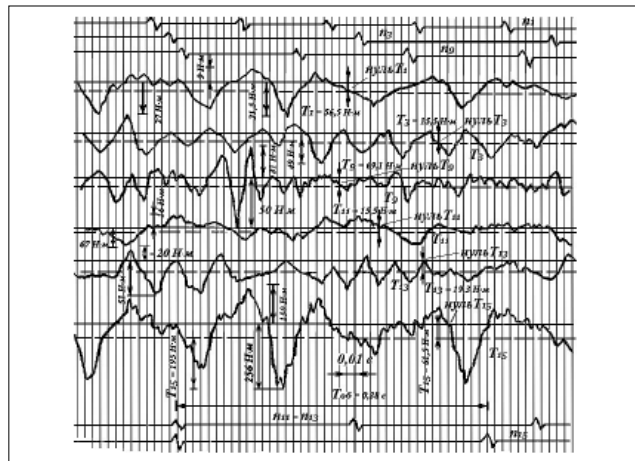


Рис. 2. Осциллограмма колебательного процесса вращающихся звеньев сепаратора почвы
 Fig. 2. Oscillogram demonstrating oscillatory motion of the soil separator's rotating elements

Таким образом, при определении частот собственных колебаний рыхлительного барабана вибратор крепился к звездочке $z = 40$ привода этого барабана, а колебаний первого и второго вала сепарирующего транспортера вибратор крепился и к звездочке $z = 13$ привода этих транспортеров.

Частоты собственных колебаний определялись на следующих узлах:

- ведущем и ведомом валах элеваторов вибратор крепился к звездочке $z = 13$;
- рыхлительном барабане вибратор крепился к звездочке $z = 40$ привода этого барабана.

Предложенный экспериментальный подход изучения характера распределения динамической нагрузки по длине рабочих органов барабанного типа машин для подготовки почвы, основанный на методе тензометрирования и осциллографирования колебательных процессов, позволяет установить закономерности и числовые значения динамических нагрузок, действующих на опоры и валы этих рабочих органов в эксплуатационных условиях работы.

Результаты обработки осциллограммы по определению парциальных частот колебаний вращающихся узлов сепаратора почвы показали, что для ведущих и ведомых валов элеватора сепарирующего транспортера этот показатель составляет $107,7 \text{ с}^{-1}$, для рыхлительного барабана – $128,9 \text{ с}^{-1}$. Характер этих колебаний имеет синусоидальную форму с периодом $T = 0,053 \text{ с}$.

Выводы. Предложенный экспериментальный подход к изучению характера собственных частот

колебаний рыхлительного барабана, основанный на методе тензометрирования и осциллографирования колебательных процессов, позволяет установить закономерности и получить числовые значения динамических нагрузок, действующих на правые и левые опоры, которые достигают соответственно $330 \pm 6,5$ и $1700 \pm 6,5 \text{ Н}$, в эксплуатационных условиях работы.

Экспериментально установлено, что графики крутильных колебаний на узле ведущего и ведомого вала элеватора и рыхлительного барабана представляют собой синусоиду с периодом $T = 0,053 \text{ с}$.

Предлагаемый подход изучения колебаний рыхлительного барабана машин для подготовки почвы перед посадкой картофеля, определяющий условия их функционирования, может быть использован для анализа действия рабочих органов барабанного типа различных сельскохозяйственных или аналогичных машин.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Чаткин М.Н., Федоров С.Е., Бычков М.В., Жалнин А.А. Экспериментальное исследование рабочего органа глубокорыхлителя // *Сельский механизатор*. 2022. N2. С. 12-14. EDN: FXEUJH.
- Байбобоев Н.Г., Рахманов Д.О., Хамзаев А.А. Обоснование влияния параметров машины-сепаратора на эффективность сепарации почвы // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2013. N5-1(12). С. 93-96.
- Байбобоев А.Н., Кодиров С.Т., Акбаров Ш.Б. и др. Расчет технологического процесса сепарации почвы с рыхлительным барабаном // *Научно-техническое обеспечение сельского хозяйства*. 2019. С. 60-64. EDN: BVLEMP.
- Байбобоев Н.Г., Рамазанова Г.Г., Гойипов У.Г. и др. Оптимизация параметров сепарирующих рабочих органов картофелеуборочной машины // *Universum: технические науки*. 2023. N5-3(110). С. 28-32. DOI: 10.32743/UniTech.2023.110.5.15475.
- Алдошин Н.В., Маматов Ф.М., Исмаилов И.И. Средства механизации для обработки почвы в бахчеводстве // *Техника и оборудование для села*. 2021. N2 (284). С. 12-15. DOI: 10.33267/2072-9642-2021-2-12-15.
- Гаджиев П.И., Рамазанова Г.Г., Гаджиев И.П. Разработка ресурсосберегающей технологии и технических средств для возделывания картофеля // *Наука в Центральной России*. 2024. N1(67). С. 110-117. DOI: 10.35887/2305-2538-2024-1-110-117.
- Белоусов С.В., Камбулов С.И., Рыков В.Б., Туровский Б.В. Кинематика ротационных почвообрабатывающих машин // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование*. 2023. N1(69). С. 509-519. DOI: 10.32786/2071-9485-2023-01-56.
- Гаджиев П.И., Рамазанова Г.Г., Байбобоев Н.Г. и др. Анализ работ в области динамической нагруженности комкоразрушающих барабанов от взаимодействия с почвой // *Техника и оборудование для села*. 2025. N3(333). С. 22-28. DOI: 10.33267/2072-9642-2025-3-22-28.
- Дорохов А.С., Ерохин М.Н., Сибирев А.В., Мосяков М.А. Энергия разрушения почвенных комков сепарирующим рабочим органом в зависимости от физико-механических свойств почвы // *Агроинженерия*. 2024. Т. 26. N4. С. 4-12. DOI: 10.26897/2687-1149-2024-4-4-12.
- Мехеда В.А. Моделирование упруго-пластического деформирования приповерхностных слоев материалов // *Вестник Самарского университета. Естественнонаучная серия*. 2024. Т. 30. N3. С. 25-34. DOI: 10.18287/2541-7525-2024-30-3-25-34.
- Ямпольский Д.З. О возможности определения энергии ударного импульса методом индикаторных диаграмм // *Вестник научно-технического развития*. 2024. N2(173). С. 9-15. DOI: 10.18411/vntr2024-173-2.
- Lü J., Shang Q., Yang Y. et al. Design Optimization and experiment on potato haulm cutter. *Transactions of the CSAM*. 2016. N47(5). 106-114. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.015.
- Измайлов А.Ю., Колчин Н.Н., Лобачевский Я.П., Кынев Н.Г. Современные технологии и специальная техника для картофелеводства // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2015. N2. С. 45-48. EDN: TTLVUJ.
- Тетерин В.С., Панферов Н.С., Хортов А.В. и др. Эволюция картофелеуборочной техники // *Технический сервис машин*. 2025. Т. 63. N3. С. 119-126. DOI: 10.22314/2618-8287-2025-63-3-119-126.
- Zhou J.G., Gao Z.N., Chen J. et al. Design and experiment of a self-propelled crawler-potato harvester for hilly and mountainous areas. *INMATEH Agricultural Engineering*. 2021. N2. 151-158. DOI: 10.35633/inmateh-64-14.

16. Ахалая Б.Х., Старовойтов С.И., Ценч Ю.С. и др. Комбинированный агрегат с универсальным рабочим органом для поверхностной обработки почвы // *Техника и оборудование для села*. 2020. N8 (278). С. 8-11. DOI: 10.33267/2072-9642-2020-8-8-11.
17. Лобовский М.О., Туккия А.Л., Пяткин П.А. Сравнение метода измерений деформаций и усилий с применением микрометра и тензорезистивного метода контроля напряженно-деформированного состояния // *Вестник гражданских инженеров*. 2021. N3(86). С. 71-75. DOI: 10.23968/1999-5571-2021-18-3-71-75.
18. Адеянов И.Е. Александра М.Ю. Применение тензодатчиков в расчете напряженно-деформированного состояния нежесткого стержня при внецентренном растяжении // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2024. Т. 26. N4-2(120). С. 244-250. DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-4(2)-244-250.
19. Веремейчик А.И., Мартынов А.В., Добрияник Ю.А. Оптимизация материала для изготовления балок под тензометрические датчики // *Механики XXI века*. 2024. N23. С. 416-423. EDN: DCWWEV.
20. Попов А.М., Мехдиев Р.В.О. Исследования износа и вибраций зубчатых передач в сельскохозяйственном оборудовании // *Механики XXI века*. 2023. N22. С.182-186. EDN: PAZRIM.

REFERENCES

1. Chatkin M.N., Fedorov S.E., Bychkov M.V., Zhalnin A.A. Experimental study of the working organ of the deep-loader. *Selskiy Mechanizator*. 2022. N2. 12-14 (In Russian) EDN: FXEUJH.
2. Bayboboev N.G., Rakhmanov D.O., Khamzaev A.A. The motivation of the separator-machine parameters's influence on the efficiency of soil separation. *International Research Journal*. 2013. N5-1(12). 93-96 (In Russian).
3. Bayboboev A.N., Kodirov S.T., Akbarov Sh.B. et al. Calculation of the technological process of soil separation with a loosening drum. *Scientific and Technical Support for Agriculture*. 2019. 60-64 (In Russian). EDN: BBLEMP.
4. Bayboboev N.G., Ramazanova G.G., Goyipov U.G. et al. Optimization of the parameters of the separating working bodies of a potato harvester. *Universum: Technical Sciences*. 2023. N5-3(110). 28-32 (In Russian). DOI: 10.32743/UniTech.2023.110.5.15475.
5. Aldoshin N.V., Mamatov F.M., Ismailov I.I. Mechanization means for tillage in melon growing. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2021. N2 (284). 12-15 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2021-2-12-15.
6. Gadzhiev P.I., Ramazanova G.G., Gadzhiev I.P. Development of resource-saving technology and technical means for potato cultivation. *Science in the Central Russia*. 2024. N1(67). 110-117 (In Russian). DOI: 10.35887/2305-2538-2024-1-110-117.
7. Belousov S.V., Kambulov S.I., Rykov V.B., Turovsky B.V. Kinematics of rotary tillage machines. *Proceedings of Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education*. 2023. N1(69). 509-519 (In Russian). DOI: 10.32786/2071-9485-2023-01-56.
8. Gadzhiev P.I., Ramazanova G.G., Baiboboev N.G. et al. Analysis of dynamic loading of lump-crushing drums as a result of interaction with soil. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2025. N3(333). 22-28 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2025-3-22-28.
9. Dorokhov A.S., Erokhin M.N., Sibirev A.V., Mosyakov M.A. Energy of soil clod crushing with a separating working tool, depending on physical and mechanical properties of the soil. *Agricultural Engineering*. 2024. Vol. 26. N4. 4-12 (In Russian). DOI: 10.26897/2687-1149-2024-4-4-12.
10. Mekheda V.A. Modeling of elastic-plastic deformation of near-surface layers of materials. *Bulletin of Samara University. Natural Science Series*. 2024. Vol. 30. N3. 25-34 (In Russian). DOI: 10.18287/2541-7525-2024-30-3-25-34.
11. Yampolsky D.Z. About the possibility of determining energy of the shock pulse by the method of indicator diagrams. *Bulletin of Scientific and Technical Development*. 2024. N2(173). 9-15 (In Russian). DOI: 10.18411/vntr 2024-173-2.
12. Lü J., Shang Q., Yang Y. et al. Design optimization and experiment on potato haulm cutter. *Transactions on the CSAM*. 2016. N47(5). 106-114 (In English). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.015.
13. Izmaylov A.Yu., Kolchin N.N., Lobachevskiy Ya.P., Kynnev N.G. Modern technologies and special equipment for potato production. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2015. N2. 45-48 (In Russian). EDN: TTLVUJ.
14. Teterin V.S., Panferov N.S., Khortov A.V. et al. Evolution of potato harvesting equipment. *Machinery Technical Service*. 2025. Vol. 63. N3. 119-126 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2025-63-3-119-126.
15. Zhou J.G., Gao Z.N., Chen J., Yang S.M., Li M.Q., Chen Z., Zhou J.D. Design and experiment of a self-propelled crawler-potato harvester for hilly and mountainous areas. *INMATEH Agricultural Engineering*. 2021. N2. 151-158 (In English). DOI: 10.35633/inmateh-64-14.
16. Akhalaia B.Kh., Starovoitov S.I., Tsench Yu.S. et al. A combined unit fitted with a versatile working body for surface tillage. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2020. N8 (278). 8-11 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2020-8-8-11.
17. Lobovskiy M.O., Tukkiya A.L., Pyatkin P.A. Comparison analysis of using micrometers and strain gauges for measuring deformations and loads in the method of monitoring the stress-strain state. *Bulletin of Civil Engineers*. 2021. N3 (86). 71-75 (In Russian). DOI: 10.23968/1999-5571-2021-18-3-71-75.
18. Adeyanov I.E., Aleksandrova M.Yu. Train gauges in stress-strain state calculation of a non-rigid rod under noncen-

- tral tensile. *Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2024. Vol. 26. N4-2 (120). 244-250 (In Russian). DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-4(2)-244-250.
19. Veremeychuk A.I., Martynov A.V., Dobriyanik Yu.A. Optimization of material for the manufacture of beams for

- strain gauges. *Mechanics of the XXI Century*. 2024. N23. 416-423 (In Russian). EDN: DCWWEV.
20. Popov A.M., Mekhdiev R.V.O. Studies of wear and vibration of gears in agricultural equipment. *Mechanical Engineers to XXI Century*. 2023. N22. 182-186 (In Russian). EDN PAZRIM.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Байбобоев Н.Г. – формулирование основной концепции исследования;
Гаджиев П.И. – научное руководство, постановка задачи исследования;
Рамазанова Г.Г. – формирование общих выводов;
Бахадиров Г.А. – критический анализ полученных результатов;
Умирзоков Ж.У. – литературный анализ данных.
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Bayboboev N.G. – formulation of the study concept;
Gadzhiev P.I. – scientific supervision and definition of the research problem;
Bahadirov G.A. – critical analysis of the obtained results;
Umirzokov J.U. – literature review.
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

03.12.2025
30.01.2026



Обоснование целесообразности и параметров противоэрозионного элемента рабочего органа глубокорыхлителя

Галина Геннадьевна Пархоменко¹,
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: parkhomenko.galya@yandex.ru;

Сергей Иванович Камбулов^{1,2},
доктор технических наук, доцент,
главный научный сотрудник,
e-mail: kambulov.s@mail.ru;
Никита Владимирович Бужинский¹,
аспирант,
e-mail: 27091999n@mail.ru

¹Аграрный научный центр «Донской», г. Зерноград, Российская Федерация;

²Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Реферат. Отметим, что при разработке нового рабочего органа параметры и режимы его функционирования необходимо определять комплексно с использованием согласованных между собой зависимостей. Должны быть учтены не только форма рабочего органа, но и физико-механические свойства почвенной среды, которые не однородны, устойчивый ход работы, а также выполнены требуемые качественные и энергетические показатели технологического процесса. (*Цель исследования*) Разработка противоэрозионного глубокорыхлителя, извлекающего комки на поверхность почвы. (*Материалы и методы*) Рабочий орган нового типа предназначен для основной обработки почвы и глубокого (свыше 25 сантиметров) рыхления без оборота пласта с образованием кротовин при противоэрозионной обработке почвы. Представлена схема взаимодействия рабочего органа с почвой. (*Результаты и обсуждение*) Научную новизну исследований представляют зависимости взаимосвязи параметров и режимов функционирования нового рабочего органа в процессе взаимодействия с объектом. С использованием этих зависимостей разработана методика инженерного расчета рабочего органа в виде усиленных прутков при взаимодействии с поверхностями. Обоснованы способ движения пласта почвы и варианты его разрушения при взаимодействии с вторичными плоскостями разрушения, которые возникают в процессе подъема почвы. (*Выводы*) Установлены параметры и режимы функционирования нового рабочего органа глубокорыхлителя: проходной размер между прутками в начале процесса схода пласта должен быть не более 50 миллиметров. Для оптимальной траектории комка почвы форма прутка должна соответствовать уравнению брахистохроны первого порядка (циклоиды), длина прутка рабочего органа глубокорыхлителя составляет от 0 до 0,4 метра.

Ключевые слова: обработка почвы, рабочий орган, культиватор, процесс работы, энергетические показатели, статистика, модернизация.

■ **Для цитирования:** Пархоменко Г.Г., Камбулов С.И., Бужинский Н.В. Обоснование целесообразности и параметров противоэрозионного элемента рабочего органа глубокорыхлителя // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2026. Т. 20. №1. С. 52-57. DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-1-52-57. EDN: BOVNBW.

Scientific article

Justification of the Expediency and Parameters of the Anti-Erosion Element in the Working Tool of the Deep Soil Loosener

Galina G. Parkhomenko¹,
Ph.D.(Eng.), leading researcher,
e-mail: parkhomenko.galya@yandex.ru;

Sergey I. Kambulov^{1,2},
Dr.Sc.(Eng.), associate professor, chief researcher,
e-mail: kambulov.s@mail.ru;
Nikita V. Buzhinsky¹,
postgraduate student,
e-mail: 27091999n@mail.ru

¹Agricultural Research Center "Donskoy", Zernograd, Russian Federation;

²Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Abstract. The development of a new working tool for deep soil loosening requires a comprehensive approach to determining its design parameters and operating modes, based on interrelated and harmonized dependencies. The design process must account not only for the geometry of the tool itself but also for the heterogeneous physical and mechanical properties of the soil environment. It is also essential to ensure stable operation and achieve the required quality of work and energy efficiency of the technological process. *(Research purpose)* The aim of this study is to develop an anti-erosion deep soil loosener capable of bringing soil clods to the surface. *(Materials and methods)* The newly designed working tool is designed for primary tillage and deep loosening of soil to depths exceeding 25 centimeters, without inverting the soil layer. During anti-erosion treatment, it simultaneously forms mole-like channels. A schematic diagram is presented to illustrate the interaction between the working tool and the soil. *(Results and discussion)* The scientific novelty of the study lies in establishing dependencies that describe the relationship between the tool's design parameters and its operating modes during its interaction with the soil. These dependencies form the basis for developing an engineering method for calculating the tool, which is implemented in the form of reinforced bars that interact with the soil surface. The study also substantiates the mechanism of soil layer displacement and identifies the potential disruption modes, including the formation of secondary fracture planes that occur during the upward movement of the soil layer. *(Conclusions)* The parameters and operating modes of the working tool of the new deep soil loosener have been determined. To initiate effective soil descent, the clearance between the bars should not exceed 50 millimeters. For optimal soil clod trajectory, the shape of the bars should follow a first-order brachistochrone curve (a cycloid). The bar length of the working tool ranges from 0 to 0.4 meters, depending on soil conditions and operational requirements.

Keywords: soil cultivation, working tool, cultivator, working process, energy performance, statistics, modernization.

■ **For citation:** Parkhomenko G.G., Kambulov S.I., Buzhinsky N.V. Justification of the expediency and parameters of the anti-erosion element in the working tool of the deep soil loosener. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2026. Vol. 20. N1. 52-57 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-1-52-57. EDN: BOVNBW.

Совокупность технологических приемов глубокой обработки почвы можно представить в виде схемы (рис. 1). Для эрозионно-опасных почв рекомендуется применять плоскорезные рабочие органы [1]. Такая обработка способствует уменьшению количества пылевидных частиц размером не более 1 мм в верхнем слое почвы.

Преобладание ветроустойчивых агрегатов почвы в верхнем слое по сравнению с пылевидными частицами снижает вероятность возникновения ветровой эрозии. Негативному действию ветровой эрозии подвержены почвы с большим количеством пылевидных частиц в составе структуры [3]. К ветроустойчивым агрегатам почвы могут относиться частицы крупнее 1 мм [4].

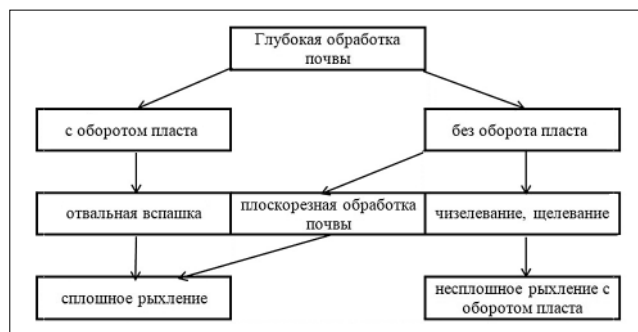


Рис. 1. Приемы глубокой обработки почвы

Fig. 1. Deep tillage techniques

Проблема заключается в том, что при эрозионных процессах происходит потеря гумуса [5]. Зачастую эрозионные процессы отрицательно влияют

на плодородие почвы [6]. При этом гумус рассматривается в качестве основного определяющего плодородие почвы компонента [7].

Воздействие на почву рабочими органами может приводить к усилению эрозионных процессов [8, 9]. При этом техногенное и антропогенное воздействие являются основной причиной ускоренной эрозии почвы [10]. Ускоренная почва эрозия в основном обусловлена изменениями в землепользовании. Эрозия почвы значительно превышает темпы производства во многих сельскохозяйственных регионах [11].

Современная парадигма природопользования (*Sustainable Agriculture*) в рамках принятых ООН целей устойчивого развития (*Sustainable Development Goals*) предусматривает удовлетворение потребностей человека без вреда для будущих поколений [12]. Нерациональные способы обработки почвы приводят к деградации и потере плодородия [13, 14]. Необходимо принимать меры для предотвращения или уменьшения эрозии почвы, чтобы сохранить ее продуктивность [15].

Потери почвы в подверженных эрозии регионах Европейского союза составляют 2,46 т/га в год, что приводит к общей потере почвы в объеме 970 млн т в год [16]. На европейском уровне было предпринято много усилий для содействия более экологически безопасной обработке почвы [17].

Разрабатываются методы сохранения почвы в регионах подверженных эрозии [18]. Одним из способов борьбы с деградацией почвы, вызванной усилением эрозионных процессов, является снижение

уплотняющего воздействия на пласт [19-21]. При разуплотнении крупные комки почвы, находящиеся внутри обработанного слоя почвы, извлекаются на поверхность рабочими органами для измельчения.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ: разработка противоэрозийного глубокорыхлителя с извлечением комков на поверхность почвы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. В отделе механизации растениеводства АНЦ «Донской» разработан новый глубокорыхлитель для безотвальной обработки почвы, который может выполнять несколько технологических приемов. Рабочий орган предназначен для основной обработки почвы и глубокого (свыше 25 см) рыхления без оборота пласта с образованием кротовин при противоэрозийной обработке, а также для уничтожения сорной растительности и щелевания с почвоуглублением. Кротовины образуются при взаимодействии с пластом призматических клиньев 2, расположенных на плоскорезных лапах и служащих для крепления прутков 1 при их демонтаже (рис. 2).

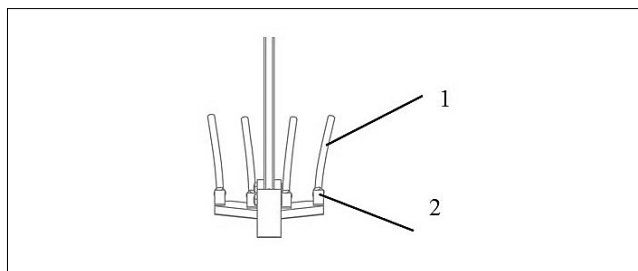


Рис. 2. Кротователи
Fig. 2. Mole plows

Щелевание с почвоуглублением до 45 см осуществляется при демонтированных плоскорезных лапах с прутками посредством взаимодействия долота с пластом почвы. Прутки способствуют улучшению качества крошения почвы, вынося на поверхность крупные комки из глубины обрабатываемого пласта.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. При процессе схода пласта с поверхности рабочего органа прутки за счет своего изгиба формируют конфигурацию борозды в продольно-вертикальной плоскости (рис. 3). Подобно салазкам они оказывают некоторое уплотняющее воздействие на поверхность обработанного пласта, создавая дифференцированные слои почвы. Изгиб прутьев целесообразно производить по конфигурации линий скольжения почвы, по пути наименьшего сопротивления или распространения трещин.

При глубокой обработке почвы (свыше 25 см) требуется преобладание в обработанном слое фрагментов размером не более 50 мм, поэтому проходной размер между прутками в начале процесса схода пласта должен этому условию соответствовать (рис. 4).

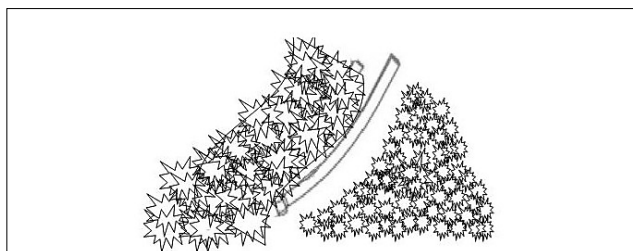


Рис. 3. Конфигурация разрушенного пласта при сходе рабочего органа
Fig. 3. Configuration of the fractured soil layer as it leaves the working tool

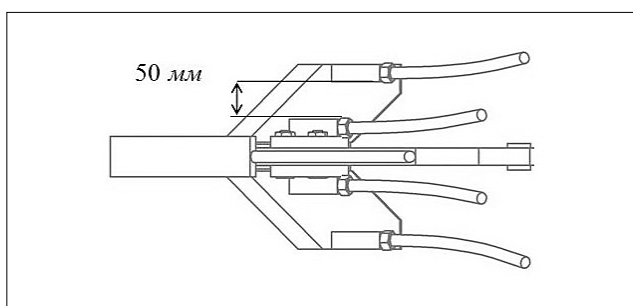


Рис. 4. Расстояние между прутками рабочего органа глубокорыхлителя
Fig. 4. Bar spacing in the working tool of the deep soil loosener

В результате взаимодействия неразрушенных глыб с прутками при сходе пласта за счет изгиба образуются вторичные плоскости разрушения (сдвига), направленные под углом к первичным плоскостям, которые возникают в процессе подъема почвы. По этой причине целесообразно выбирать расстояние между прутками, исходя из допустимого размера фрагмента почвы при обработке глубокорыхлителем, регламентируемого агротехническими требованиями.

Важнейшим показателем характеристики обработанного фона, задаваемым агротехническими требованиями, является качество крошения почвы, обусловленное наличием фрагментов определенного размера. Известно, что форма, заданная брахистохроной (циклоидой), представляет собой линию оптимального (минимального) пути точки с одного вертикального уровня на другой (рис. 5). Например, точка A_0 находится на поверхности обработанного пласта рабочим органом A_{n+1} на дне борозды.

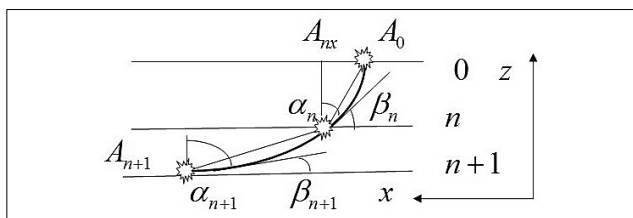


Рис. 5. Выбор формы кривой для изгиба прутков
Fig. 5. Choosing the curve shape for bar bending

В соответствии с законом сохранения энергии

$$\frac{V^2}{2} = g \cdot z, V = \sqrt{2 \cdot g \cdot z},$$

где V – скорость, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с²; z – глубина (уровень) расположения слоя почвы, м.

То есть, скорость осыпания вспушенной почвы зависит от вертикального расстояния между уровнями, которое ограничено глубиной обработки.

При безотвальной обработке почвы перемещение слоев не наблюдается, однако имеет место перемешивание фрагментов, некоторые из них под влиянием сепарации могут даже достигать дна борозды с переменной во времени скоростью ввиду неоднородности пласта. При этом пласт можно представить в виде совокупности слоев.

При допущении, что скорость изменяется дискретно с бесконечно малым шагом, наикратчайшее суммарное перемещение A_0 в A_n наблюдается по прямой за время (τ):

$$\tau = \frac{A_0 A_n}{V_n} + \frac{A_n A_{n+1}}{V_{n+1}},$$

где $A_0 A_n$ и $A_n A_{n+1}$ – расстояние между уровнями, м.

Однако ввиду изменения скорости внутри пласта путь фрагмента почвы состоит из совокупности прямолинейных участков, располагаемых под разным углом, т.е. наблюдается преломление прямолинейной траектории перемещения.

Из анализа [рисунка 5](#) следует, что

$$V = \frac{V_n}{\sin \alpha_n}, \sin \alpha_n = \frac{V_n}{V} = \frac{A_0 A_n}{A_0 A_n}, V = \frac{V_{n+1}}{\sin \alpha_{n+1}},$$

где α_n – угол между вертикальной плоскостью и касательной к траектории перемещения частицы на уровне n , град.

По закону Снеллиуса показатель преломления представляет собой отношение скоростей в неоднородных средах:

$$\frac{V_n}{\sin \alpha_n} = \frac{V_{n+1}}{\sin \alpha_{n+1}}.$$

Поскольку неравномерность скорости является следствием неоднородности среды, то время, необходимое для перемещения фрагмента почвы по кратчайшему пути, не представляет собой минимум. По этой причине наблюдается преломление прямолинейной траектории, которая трансформируется в ломаную ввиду различия углов падения и преломления.

Исходя из закона Снеллиуса

$$\frac{\sin \alpha}{V} = const.$$

При этом

$$\alpha + \beta = \frac{\pi}{2}.$$

Угол β между направлением движения и касательной к искомой траектории, представляющей собой кривую

$$tg \beta = \frac{dz}{dx} = \frac{\dot{z}}{z}, \sin \alpha = \cos \beta = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\dot{z}}{z}\right)^2}}.$$

Таким образом, получаем дифференциальное уравнение брахистохроны первого порядка (циклоиды) для оптимальной траектории фрагмента почвы:

$$z \cdot \left(1 + \left(\frac{\dot{z}}{z}\right)^2\right) = const. \quad (1)$$

В параметрическом виде уравнения циклоиды имеют вид:

$$x = r \cdot (t - \sin t), z = r \cdot (1 - \cos t).$$

Длина дуги в общем виде:

$$l_{прутка} = \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2} dt; l_{прутка} = 2 \cdot r \cdot \left|\sin \frac{t}{2}\right|, \quad (2)$$

где r – радиус производящего круга, м; t – параметр циклоиды, рад.

Полученное соотношение не противоречит определению, согласно которому длина дуги есть предел, к которому стремится периметр ломаной, вписанной в кривую.

Радиус производящего круга циклоидальной конфигурации прутков рабочего органа представляет собой толщину пласта, которая эквивалентна глубине рыхления, а параметр циклоиды t изменяется от 0 до π :

$$l_{прутка} = 2 \cdot a \cdot \left|\sin \frac{t}{2}\right|, 0 \leq t \leq \pi. \quad (3)$$

Таким образом, длина прутка рабочего органа глубокорыхлителя составляет $0 \leq l_{прут} \leq 0,4$ м.

Выводы

Исследование показало, что прутки рабочего органа глубокорыхлителя способствуют улучшению качества крошения почвы, вынося на поверхность крупные комки из глубины обрабатываемого пласта.

Изгиб прутков рабочего органа целесообразно производить по конфигурации линий скольжения почвы, по пути наименьшего сопротивления или распространения трещин.

Проходной размер между прутками в начале процесса схода пласта должен составлять не более 50 мм.

Для оптимальной траектории комка почвы форма прутка должна соответствовать уравнению брахистохроны первого порядка (циклоиды). Длина прутка рабочего органа глубокорыхлителя должна быть в пределах от 0 до 0,4 м.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лискин И.В., Лобачевский Я.П., Миронов Д.А. и др. Результаты лабораторных исследований почворезущих рабочих органов // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. N4. С. 41-47. DOI: 10.22314/2073-7599-2018-12-4-41-47.
2. Кадамов А., Икромов И.И. Интенсивность проявления ветровой эрозии в верховьях Ишкашимского района ГБАО // *Земледелец*. 2014. N4. С. 91-94. EDN: TLINPD.
3. Лачуга Ю.Ф., Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Мазитов Н.К. Почвообрабатывающая техника: пути импортозамещения // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2017. N2. С. 37-42. DOI: 10.22314/2073-75992017.2.3741.
4. Наумова Н.С. Деградационные процессы на почвах сельскохозяйственного назначения // *Молодежь и наука*. 2020. N7. С. 20. EDN: IFNWDU.
5. Оказова З.П., Березов Т.А. Об эрозионных процессах на территории Республики Северная-Осетия Алания // *Известия Чеченского государственного педагогического университета. Серия 2. Естественные и технические науки*. 2019. Т. 18. N2(21). С. 29-32. EDN: IKTFEX.
6. Лобачевский Я.П., Ценч Ю.С., Бейлис В.М. Создание и развитие систем машин и технологий для комплексной механизации технологических процессов в растениеводстве // *История науки и техники*. 2019. N12. С. 46-55. DOI: 10.25791/intstg.12.2019.1081.
7. Стифеев А.И., Никитина О.В., Лазарев В.И., Зиновьев Р.А. Экология пахотных земель Центрального Черноземья в условиях антропогенного воздействия // *Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии*. 2020. N5. С. 37-45. EDN: RXOGWU.
8. Шехихачева Л.З. Методические подходы к оценке экологического состояния почв // *Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В.М. Кокова*. 2022. N1(35). С. 23-34. DOI: 10.55196/2411-3492-2022-1-35-23-34.
9. Алахвердиев Ф.Д., Набиев О.С. Исследование механизмов дефляции в Северо-Западном Прикаспии индикационными методами для целей охраны и оптимизации почвенных ресурсов // *Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки*. 2017. Т. 11. N3. С. 90-95. EDN: YQXQAX.
10. Borrelli P., Robinson D.A., Fleischer L.R. et al. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nature Communications*. 2013. Vol. 8. DOI: 10.1038/s41467-017-02142-7.
11. Amundson R., Berhe A.A., Hopmans J.W. et al. Soil and human security in the 21st century. *Soil Science*. 2015. Vol. 348. DOI: 10.1126/science.1261071.
12. Boardman J. Soil erosion science: Reflections on the limitations of current approaches. *Catena*. 2006. Vol. 68. 73-86. DOI: 10.1016/j.catena.2006.03.007.
13. Keesstra S.D., Bouma J., Wallinga J. et al. The significance of soils and soil science towards realization of the United Nations Sustainable Development Goals. *Soil*. 2016. Vol. 2. 111-128. DOI: 10.5194/soil-2-111-2016.
14. Montanarella L., Jon Pennock D., McKenzie N. et al. World's soils are under threat. *Soil*. 2016. Vol. 2. 79-82. DOI: 10.5194/soil-2-79-2016.
15. Lugato E., Paustian K., Panagos P. et al. Quantifying the erosion effect on current carbon budget of European agricultural soils at high spatial resolution. *Global Change Biology*. 2016. Vol. 22. 1976-1984. DOI: 10.1111/gcb.13198.
16. Panagos P., Borrelli P., Poesen J. et al. The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. *Environmental Science & Policy*. 2015. Vol. 54. 438-447. DOI: 10.1016/j.envsci.2015.08.012.
17. Borrelli P., Paustian K., Panagos P. et al. Effect of good agricultural and environmental conditions on erosion and soil organic carbon balance: a national case study. *Land Use Policy*. 2016. Vol. 50. 408-421. DOI: 10.1016/j.landusepol.2015.09.033.
18. Panagos P., Imeson A., Meusburger K. et al. Soil conservation in Europe: wish or reality? *Land Degradation & Development*. 2016. Vol. 27. 1547-1551. DOI: 10.1002/ldr.2538.
19. Пархоменко С.Г., Пархоменко Г.Г. Моделирование следящих систем почвообрабатывающих агрегатов // *Тракторы и сельхозмашины*. 2017. N1. С. 22-31. DOI: 10.17816/0321-4443-66258.
20. Мазитов Н.К., Лобачевский Я.П., Дмитриев С.Ю. и др. Модернизированная технология и техника для обработки почвы и посева в экстремальных условиях // *Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук*. 2014. N6. С. 63-67. EDN: SXGEKD.
21. Дорохов А.С., Сибирев А.В., Аксенов А.Г., Мосяков М.А. Аналитическое обоснование системы автоматического контроля глубины обработки почвы // *Агроинженерия*. 2021. N3(103). С. 19-23. DOI: 10.26897/2687-1149-2021-3-19-23.

REFERENCES

1. Liskin I.V., Lobachevsky Ya.P., Mironov D.A. et al. Laboratory study results of soil-cutting operating elements. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2018. N12(4). 41-47 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2018-12-4-41-47.
2. Kadamov A., Ikromov I.I. Intensity of wind erosion in the upper reaches of the Ishkashim district of GBAO. *Zemle-*
3. Lachuga Yu.F., Izmaylov A.Yu., Lobachevskiy Ya.P., Mazitov N.K. Soil-cultivating machinery: ways of import substitution. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2017. N2. 37-42. (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2017-2-37-41.

4. Naumova N.S. Degradation processes on agricultural soils. *Youth and Science*. 2020. N7. 20 (In Russian). EDN: IFNWDU.
5. Okazova Z.P., Berezov T.A. On erosion processes in the territory of the Republic of North Osetia-Alanya. *Bulletin of Chechen State Pedagogical University*. 2019. Vol. 18. N2(21). 29-32 (In Russian). EDN: IKTFEX.
6. Lobachevskiy Ya.P., Tsench Yu.S., Beylis V.M. Creation and development of systems for machines and technologies for the complex mechanization of technological processes in crop production. *History of Science and Engineering*. 2019. N12. 46-55 (In Russian). DOI: 10.25791/int-stg.12.2019.1081.
7. Stifeev A.I., Nikitina O.V., Lazarev V.I., Zinoviev R.A. Ecology of agricultural lands of the Central Black Earth under conditions of anthropogenic exposure. *Vestnik of Kursk State Agricultural Academy named after I.I. Ivanov*. 2020. N5. 37-45 (In Russian). EDN: RXOGWU.
8. Shekikhacheva L.Z. Methodological approaches to the assessment of the ecological state of the soil. *Izvestiya of Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov*. 2022. N1(35). 23–34 (In Russian). DOI: 10.55196/2411-3492-2022-1-35-23-34.
9. Alahverdiev F.D., Nabiev O.S. Analysis of deflation mechanisms in the North-Western Caspian Sea region by means of indicating methods of protection and optimization soil resources. *Dagestan State Pedagogical University. Journal. Natural and Exact Sciences*. 2017. Vol. 11. N3. 90-95 (In Russian). EDN: YQXQAX.
10. Borrelli P., Robinson D.A., Fleischer L.R. et al. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nature Communications*. 2013. Vol. 8 (In English). DOI: 10.1038/s41467-017-02142-7.
11. Amundson R., Berhe A.A., Hopmans J.W. et al. Soil and human security in the 21st century. *Soil Science*. 2015. Vol. 348 (In English). DOI: 10.1126/science.1261071.
12. Boardman J. Soil erosion science: Reflections on the limitations of current approaches. *Catena*. 2006. Vol. 68. 73-86 (In English). DOI: 10.1016/j.catena.2006.03.007.
13. Keesstra S.D., Bouma J., Wallinga J. et al. The significance of soils and soil science towards realization of the United Nations Sustainable Development Goals. *Soil*. 2016. Vol. 2. 111-128 (In English). DOI: 10.5194/soil-2-111-2016.
14. Montanarella L., Jon Pennock D., McKenzie N. et al. World's soils are under threat. *Soil*. 2016. Vol. 2. 79-82 (In English). DOI: 10.5194/soil-2-79-2016.
15. Lugato E., Paustian K., Panagos P. et al. Quantifying the erosion effect on current carbon budget of European agricultural soils at high spatial resolution. *Global Change Biology*. 2016. Vol. 22. 1976-1984 (In English). DOI: 10.1111/gcb.13198.
16. Panagos P., Borrelli P., Poesen J. et al. The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. *Environmental Science & Policy*. 2015. Vol. 54. 438-447 (In English). DOI: 10.1016/j.envsci.2015.08.012.
17. Borrelli P., Paustian K., Panagos P. et al. Effect of good agricultural and environmental conditions on erosion and soil organic carbon balance: a national case study. *Land Use Policy*. 2016. Vol. 50. 408-421 (In English). DOI: 10.1016/j.landusepol.2015.09.033.
18. Panagos P., Imeson A., Meusburger K. et al. Soil conservation in Europe: wish or reality? *Land Degradation & Development*. 2016. Vol. 27. 1547-1551 (In English). DOI: 10.1002/ldr.2538.
19. Parkhomenko S.G., Parkhomenko G.G. Simulation of automatic control systems of tillage units. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2017. N1. 22-31 (In Russian). DOI: 10.17816/0321-4443-66258.
20. Mazitov N.K., Lobachevsky Ya.P., Dmitriev S.Yu. et al. Upgraded technology and equipment for processing soil and crop in extreme conditions. *Russian Agricultural Sciences*. 2014. N6. 63-67 (In Russian). EDN: SXGEKD.
21. Dorokhov A.S., Sibiryov A.V., Aksenov A.G., Mosyakov M.A. Analytical feasibility study of the automatic control system of tillage depth. *Agricultural Engineering*. 2021. N3 (103). 19-23. (In Russian). DOI: 10.26897/2687-1149-2021-3-19-23.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Пархomenko Г.Г. – методология, выполнение исследований, анализ литературных источников, доработка текста;
 Камбулов С.И. – научное руководство, постановка задачи исследования, оценка достоверности полученных результатов;
 Бужинский Н.В. – анализ литературных источников.
 Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Parkhomenko G.G. – methodology, research, literature review, manuscript revision;
 Kambulov S.I. – scientific supervision, formulation of the research objectives, evaluation of the reliability and validity of the research findings;
 Buzhinsky N.V. – literature review.
 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
 15.10.2025



Комбинированный почвообрабатывающий агрегат с универсальными рабочими органами

Бадри Хутаевич Ахалая,
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: badri53@yandex.ru;

Юлия Сергеевна Ценч,
доктор технических наук,
главный научный сотрудник,
член-корреспондент Российской академии наук,
e-mail: vimasp@mail.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Отметили, что традиционная обработка почвы с использованием плугов разной модификации приводит к чрезмерному рыхлению. В результате разрушается структура почвы, гибнет почвенная микрофлора, происходят эрозия и смыв плодородного слоя. Для предотвращения негативных процессов в почве в мировой практике земледелия широко применяются технологии минимальной обработки почвы. (*Цель исследования*) Разработка комбинированного агрегата с универсальными рабочими органами, позволяющими увеличить функциональные возможности обработки почвы и улучшить качество операций. (*Материалы и методы*) Универсальные рабочие органы выполнены в виде лап культиватора с треугольным рыхлителем почвы сверху и треугольным щелевателем снизу. Длина платформ под рабочие органы и заглушек вдвое меньшей длины оснований рыхлителя и щелевателя. Высота рыхлителей на 1/3 меньше высоты щелевателей, угол атаки плоской лапы составляет 10-15 градусов, укол наклона режущих частей к поверхности лапы рыхлителя 35 градусов, щелевателя – 25 градусов. Соотношение толщины рабочих органов к толщине крыла равно 1:3. Ширина каждой платформы равна ширине паза под нее и в четыре раза больше толщины каждого рабочего органа. (*Результаты и обсуждение*) Установили, что при движении комбинированного почвообрабатывающего агрегата лапы культиватора подрезают почву, уничтожая сорную растительность. Одновременное воздействие рыхлителей и щелевателей способствует регулированию водно-воздушного баланса в почве. (*Выводы*) Предлагаемая конструкция комбинированного агрегата с универсальными рабочими органами позволяет одновременно выполнять несколько операций: рыхление, щелевание и культивацию почвы с уничтожением сорной растительности. Финишная обработка и уплотнение почвы позволяют улучшить качество и увеличить экономическую эффективность обработки.

Ключевые слова: почвообрабатывающий агрегат, универсальные рабочие органы, рыхлитель, щелеватель, рама, платформа, заглушка.

■ **Для цитирования:** Ахалая Б.Х., Ценч Ю.С. Комбинированный почвообрабатывающий агрегат с универсальными рабочими органами // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2026. Т. 20. №1. С. 58-63. DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-1-58-63. EDN: GIGLVF.

Scientific article

Combined Tillage Unit with Universal Working Tools

Badri Kh. Akhalaia,
Ph.D.(Eng.), leading researcher,
e-mail: badri53@yandex.ru;

Yulia S. Tsench,
Dr.Sc.(Eng.), chief researcher, corresponding member
of the Russian Academy of Sciences,
e-mail: vimasp@mail.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. The paper notes that traditional soil tillage with ploughs of various designs frequently causes excessive soil loosening. This leads to the degradation of soil structure, a decline in soil microflora, and increased erosion accompanied by the loss of the fertile topsoil. To mitigate these adverse effects, minimum tillage technologies are widely applied in global agricultural practice. (*Research purpose*) To develop a combined tillage unit equipped with universal working tools that expand the functional capabilities of soil tillage and improve the quality of operations. (*Materials and methods*) The universal working tools are designed as cultivator shanks equipped with a triangular soil ripper at the top and a triangular soil splitter at the bottom. The platform lengths for mounting the tools and the plugs are equal to half the base length of the ripper and splitter. The height of the rippers is one-third

less than that of the slitters. The angle of attack of the flat shank is 10–15 degrees; the inclination angle of the cutting edges relative to the shank surface is 35 degrees for the ripper and 25 degrees for the slitter. The thickness ratio of the working tools to the wing is 1:3. The width of each platform corresponds to the width of the slot into which it is fitted and is four times the thickness of each working tool. (*Results and discussion*) It is found that during the operation of the combined tillage unit, the cultivator shanks cut the soil while simultaneously destroying weeds. The combined action of the loosening and slitting elements contributes to regulating the soil water-air balance. (*Conclusions*) The proposed design of the combined tillage unit with universal working tools enables the simultaneous execution of several operations, including loosening, slitting, and cultivation with effective weed control. Final soil treatment and compaction improve the quality and economic efficiency of tillage.

Keywords: tillage unit, universal working tools, loosening, ripper, slitter, frame, platform, plug.

For citation: Akhalaya B.Kh., Tsench Yu.S. Combined tillage unit with universal working tools. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2026. Vol. 20. N1. 58-63 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-1-58-63. EDN: GIGLVF.

Совмещение технологических операций при возделывании полевых культур путем применения комбинированных машин признано перспективным направлением в области интенсивного земледелия. При совмещении операций обработки почвы достигается комплексный эффект [1]:

- улучшается качество и сокращаются сроки агротехнических мероприятий за счет меньшего разрыва между отдельными операциями и их выполнения в оптимальных условиях;
- снижаются трудовые, энергетические и другие затраты благодаря более эффективному использованию мощных энергонасыщенных тяговых средств, уменьшению материалоемкости;
- сокращается время на обслуживание комбинированных агрегатов и машин;
- повышаются естественное плодородие и продуктивность обрабатываемых земель вследствие сокращения числа проходов и снижения уплотняющего воздействия агрегатов на почву.

Целесообразность и возможность совмещения операций определяются двумя условиями [2, 3]:

- агротехнической совместимостью одновременного проведения различных операций;
- технической реализацией более сложного рабочего процесса, выполняемого комбинированным агрегатом или машиной за один проход.

Совершенство и эффективность комбинированного агрегата должны оцениваться прежде всего по технико-экономическим показателям [4].

Цель исследования: разработка комбинированного почвообрабатывающего агрегата с универсальными рабочими органами и повышенными функциональными возможностями.

Материалы и методы. Обработка почвы представляет собой основную агротехническую операцию и универсальную возможность повышения плодородия почвы, уничтожения сорной растительности, подавления вредителей и болезней растений, предотвращения эрозионных воздействий на почву [5]. По энергоемкости и экономическим затратам

обработка почвы относится к малоэффективным приемам земледелия (*таблица*). На обработку почвы приходится от 18 до 40% общего расхода энергии на возделывание сельскохозяйственных культур [6, 7].

Современные технологии совмещения операций значительно расширяют возможности для решения проблем, возникающих при почвообработке. Выполненные работы, посвященные этой проблеме, позволяют оценить перспективы создания новой сельскохозяйственной техники на базе многофункциональных машин. Такие машины способны за один проход осуществлять одновременно различные механические воздействия [8, 9].

Возросшие потребность и внимание к разным вариантам возделывания почвы, в том числе менее энергозатратным и экологически обоснованным, объясняются двумя причинами. Первая причина имеет экологический характер. Усиление эрозионных процессов в почве под влиянием производственно-хозяйственной деятельности человека и внешних экстремальных природно-климатических факторов значительно снижает качество плодородного слоя почвы или доводят до его полной деградации.

Вторая причина обусловлена возможностью достичь достаточно высоких устойчивых экономических и качественных показателей операций по обработке почвы с меньшими материальными расходами. Очевидно и желательно, чтобы любые новые научно-технические разработки были выгодны с экономической точки зрения [10, 11].

На современном этапе минимальную обработку почвы проводят на глубине от 2 до 20 см, ее величина определяется при выборе технологии и зависит от цели ведения сельскохозяйственных работ. Перед сельхозтоваропроизводителями ставится вопрос качественного проведения операций минимальной обработки почвы, борьбы с сорной растительностью, подавления возбудителей болезни, повышения уровня аэрации, уплотнения поч-

Потребление топлива при возделывании различных агрокультур, кг/га FUEL CONSUMPTION DURING THE CULTIVATION OF VARIOUS CROPS, KG/HA				
Показатель	Пшеница	Кукуруза	Сахарная свекла	Картофель
Общее потребление	64	92	210	260
На вспашку	15	19	23	32,1
На обработку почвы	26,4	37,8	37,8	48,7
На остальные виды возделывания	11,4	18,8	14,8	16,6
Почвообрабатывающие операции, %	41	41	18	18

вы, чтобы наилучшим образом подготовить ее к посеву и дальнейшим уборочным работам [12, 13].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Коллектив научного агроинженерного центра ВИМ проводит работы по созданию новых усовершенствованных устройств для комплектации почвообрабатывающей техники. На *рисунке 1* представлен комбинированный агрегат с универсальными рабочими органами.

Комбинированный агрегат содержит сницу 1, талреп 2, шарнирно соединенные с несущей рамой 3, звеньями 4 параллелограммного механизма 5 с передней 6 и задней 7 балками. На балках установлены стойки 8 с держателями 9 и лапами 10. На несущей раме расположены продольные балки 11 и пе-

реставные по ширине балки 12.

На средней поперечной балке 13 установлен присоединенный к раме гидроцилиндр 14 с гидрозамком 15, он соединен с кареткой 16, оснащенной опорно-транспортными колесами 17.

На задней балке 18 несущей рамы закреплены стойки 19, к ним шарнирно присоединены дышло 20 и рычаг 21 с болтом 22 для регулирования высоты установки катков. Рычаг шарнирно соединен с тягой 23, на которой установлена пружина 24 с гайкой для регулирования сжатия.

Дышло 20 шарнирно соединено с кронштейнами рамки 25 секции катков. Изменением длины участка тяги 26 регулируются наклон рамки 25 и

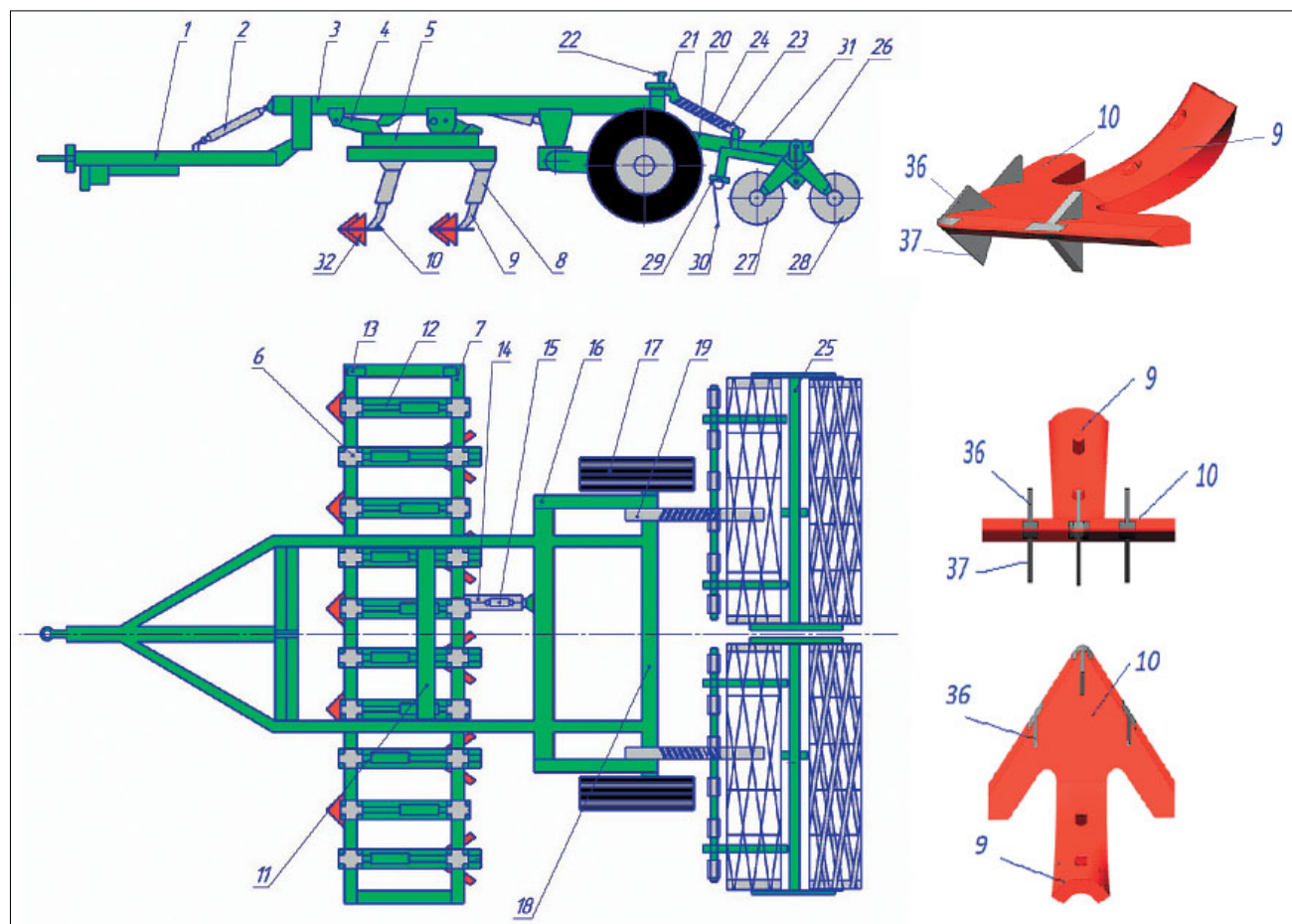


Рис. 1. Комбинированный почвообрабатывающий агрегат с универсальными рабочими органами в комплектации с тремя рыхлителями и тремя щелевателями

Fig. 1. Combined soil cultivation unit equipped with universal working tools equipped with three rippers and three slitters

положение катков 27 по высоте относительно друг друга. Такая регулировка необходима при изменении общей глубины обработки и наклона дышла посредством болта 22.

На рамке 25 установлены катки 28 с планчато-зубчатым и трубчатым барабанами (на рисунке не показаны). Дышло 20 и рамка 25 катков соединены сверху посредством тяги 29, по длине которой расположен ряд отверстий.

На дышле закреплена регулируемая по высоте установки тяга 29 с боронкой 30 с пружинными зубьями и регулировочной рейкой 31. Для крепления на рамке 25 рейка выполнена с отверстиями, чтобы изменять длину участка между пальцами.

В носовой части агрегата лапы 10 и в средней части каждого крыла 32 сверху и снизу выполнены по два паза с щелями под платформы рабочих органов с жестко закрепленными на них рыхлителями 36 и щелевателями 37.

Длина платформ 1 и заглушек 4 вдвое меньше длины оснований рыхлителя 2 и щелевателя 3 (рис. 2). Благодаря этому снижается металлоемкость конструкции.

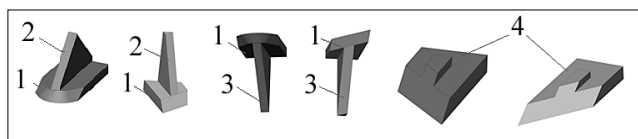


Рис. 2. Рыхлители (слева), щелеватели (в центре) и заглушки (справа)

Fig. 2. Rippers (left), scarifiers (centre) and plugs (right)

За счет опоры задней части основания на поверхность лапы обеспечивается надежное закрепление рабочего органа.

Выполнение рыхлителей и щелевателей с платформами под пазы лапы делает возможным переустановить рабочие органы по разным схемам (количеству и расположению рыхлителей и щелевателей) и таким образом изменять расстояние между обрабатываемыми полосами поля (рис. 3).



Рис. 3. Рабочие органы в различной комплектации

Fig. 3. Working tools in various configurations

Угол атаки плоской лапы, равный 10-15°, позволяет проводить обработку почвы со смещением, что улучшает качество обработки. Наклон режу-

щих частей рыхлителя и щелевателя к поверхности лапы 35 и 25° соответственно. Соотношение толщины рабочих органов к толщине крыла составляет 1:3, ширина каждой платформы равна ширине паза под нее и в четыре раза больше толщины рабочих органов. За счет этого в процессе работы агрегата рыхлители способны выдержать фронтальные нагрузки, а платформы надежно удерживаются в пазах.

Рыхлители и щелеватели предлагаются с разной конфигурацией режущей части для изменения схемы обработки почвы. Операции можно выполнять с одним, двумя и тремя рабочими органами, соответственно с разным расстоянием между обработанными полосами.

При демонтаже нескольких или всех рабочих органов на их место устанавливаются заглушки, в этом случае будет выполняться только одна операция – уничтожение сорной растительности.

Перед началом работы комбинированного агрегата рабочие органы с платформами вставляются в пазы носовой части лапы и посередине крыльев культиватора. При движении агрегата лапы, закрепленные на передней и задней балках несущей рамы, подрезают почву, уничтожая сорную растительность. Одновременно на почву воздействуют рыхлители над лапой и щелеватели под лапой, что способствует регулированию водно-воздушного баланса.

Позади культиваторных лап на рамках установлены катки и закреплены планчато-зубчатые и трубчатые барабаны, которые проводят финишную обработку и уплотнение почвы.

За один проход агрегата выполняются несколько операций: рыхление, щелевание, культивация почвы с уничтожением сорной растительности, финишная обработка и уплотнение почвы [14]. Культивацию проводят, чтобы во время посева семена размещались на плотном почвенном ложе, а сверху были присыпаны рыхлым почвенным слоем [15, 16].

Во время культивации перемешиваются слои почвы, в частности нижний влажный слой с более сухим верхним. В результате верхний слой будет терять свою влагу, а слой под ним сохранит капиллярность и будет подпитываться влагой от нижних слоев. Семенной материал должен быть размещен именно в нижнем слое, поднятом во время культивации, что способствует появлению дружных всходов [17]. Поэтому предпосевная культивация почвы должна проводиться на глубину высева семян.

Выводы. Разработка комбинированного почвообрабатывающего агрегата получила положительное решение на выдачу патента на изобретение (заявка № 2025111007 от 01.10.2025 г.).

На плотной и слишком влажной почве можно увеличить глубину культивации до 12 см, при этом

и рыхление почвы будет на глубину 12 см, а щеление – на 8 см. Для такого случая необходимо поменять рабочий орган на другой с требуемыми параметрами.

Глубина корневой системы большинства сорняков не превышает 10 см. При предпосевной куль-

тивации лапа культиватора хорошо удаляет сорняки, что способствует более экономному расходу гербицидов.

Применение заявляемого устройства позволит повысить качество и экономическую эффективность обработки почвы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П. Перспективные пути применения энерго- и экологически эффективных машинных технологий и технических средств // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2013. N4. С. 8-11. EDN: QZKYNV.
- Лачуга Ю.Ф., Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Мазитов Н.К. Почвообрабатывающая техника: пути импортозамещения // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2017. N2. С. 37-42. DOI: 10.22314/207375992017.2.3741.
- Дорохов А.С., Сибирев А.В., Аксенов А.Г., Мосяков М.А. Аналитическое обоснование системы автоматического контроля глубины обработки почвы // *Агроинженерия*. 2021. N3(103). С. 19-23. DOI: 10.26897/2687-1149-2021-3-19-23.
- Федоренко В.Ф., Киреев И.М., Марченко В.О. Исследование методов и технических средств для измерения глубины обработки почвы при испытаниях почвообрабатывающих машин // *Техника и оборудование для села*. 2019. N5 (263). С. 12-17. DOI: 10.33267/2072-9642-2019-5-12-17.
- Ахалая Б.Х., Ценч Ю.С., Старовойтов С.И. и др. Комбинированный агрегат с универсальным рабочим органом для поверхностной обработки почвы // *Техника и оборудование для села*. 2020. N8 (278). С. 8-11. DOI: 10.33267/2072-9642-2020-8-8-11.
- Ахалая Б.Х. Культиватор с универсальным глубокорыхлителем // *Сельский механизатор*. 2016. N5. С. 12-13. EDN: WAIJIR.
- Русинов А.В., Слюсаренко В.В. Влияние многократных проходов колес по одному следу на деформацию почвы // *Техника в сельском хозяйстве*. 2005. N4. С. 46-51. EDN: UJNFQL.
- Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Ценч Ю.С. и др. О синтезе роботизированного сельскохозяйственного агрегата // *Вестник российской сельскохозяйственной науки*. 2019. N4. С.63-68. DOI: 10.30850/vrsn/2019/4/63-68.
- Миронова А.В., Лискин И.В., Панов А.И. Технология восстановления целинных и залежных земель // *Технический сервис машин*. 2020. N2 (139). С. 111-121. DOI: 10.22314/2618-8287-2020-58-2-111-121.
- Цепляев А.Н., Косульников Р.А., Цепляев В.А. и др. Снижение тягового сопротивления сельскохозяйственных машин за счет минимализации его колебаний при обработке тяжелосуглинистых почв // *Агроинженерия*. 2019. N2 (90). С. 14-19. EDN: UTZXZN.
- Лискин И.В., Миронова А.В. Обоснование искусственной почвенной среды для лабораторных исследований износа и тяговых характеристик почворезущих рабочих органов // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. N3. С. 53-58. DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-3-53-58.
- Ахалая Б.Х. Совершенствование технологии заготовки качественных кормов // *Вестник ВНИИМЖ*. 2009. Т. 20. N2. С.118-122. EDN: NPUEWZ.
- Ахалая Б.Х., Шогенов Ю.Х., Старовойтов С.И. и др. Трехсекционный почвообрабатывающий агрегат с универсальными сменными рабочими органами // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2019. Т. 14. N3(54). С. 92-95. DOI: 10.12737/article_5db9656e2ade23.01560949.
- Ахалая Б.Х., Шогенов Ю.Х. Автоматизированный многофункциональный почвообрабатывающий агрегат // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2017. N6. С. 55-58. EDN: ZXLBDL.
- Жук А.Ф., Шишиморов С.А., Юнусов Г.С., Пустотин А.М. Комбинированный агрегат АПК-6 // *Сельский механизатор*. 2017. N8. С.18-19. EDN: ZBIXIJ.
- Ахалая Б.Х., Ценч Ю.С. Комбинированный агрегат для обработки почвы импульсным воздействием ударной волны // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. N4. С. 62-67. DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-4-62-67.
- Ахалая Б.Х., Шогенов Ю.Х., Ценч Ю.С., Квас С.А. Развитие технологий полосной энергоресурсосберегающей обработки почвы // *Технический сервис машин*. 2018. Т. 132. С. 232-237. EDN: VLSWCQ.

REFERENCES

- Izmailov A.Yu., Lobachevsky Ya.P. Promising ways of applying energy and environmentally efficient machine technologies and technical means. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2013. N4. 8-11 (In Russian). EDN: QZKYNV.
- Lachuga Yu.F., Izmaylov A.Yu., Lobachevskiy Ya.P., Mazi-
- Dorokhov A.S., Sibiriyov A.V., Aksekov A.G., Mosyakov M.A. Analytical feasibility study of the automatic control system

- of tillage depth. *Agricultural Engineering*. 2021. N3(103). 19-23 (In Russian). DOI: 10.26897/2687-1149-2021-3-19-23.
4. Fedorenko V.F., Kireev I.M., Marchenko V.O. Research of methods and technical means for measuring the tillage depth when testing tillage machines. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2019. N5 (263). 12-17 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2019-5-12-17.
 5. Akhalaia B.Kh., Starovoitov S.I., Tsench Yu.S. et al. A combined unit fitted with a versatile working body for surface tillage. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2020. N8 (278). 8-11 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2020-8-8-11.
 6. Akhalaya B.Kh. Cultivator with universal chisel. *Selskiy Mechanizator*. 2016. N5. 12-13 (In Russian). EDN: WAIJIR.
 7. Rusinov A.V., Slyusarenko V.V. The effect of multiple wheel passes over one track on soil deformation. *Machinery in Agriculture*. 2005. N4. 46-51 (In Russian). EDN: UJNFQL.
 8. 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.
 9. Mironova A.V., Liskin I.V., Panov A.I. Technology for restoring virgin and fallow lands. *Machinery Technical Service*. 2020. N2 (139). 111-121 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2020-58-2-111-121.
 10. Tseplyayev A.N., Kosulnikov R.A., Tseplyayev V.A. et al. Reducing traction resistance of agricultural machines by minimalizing its fluctuations when tilling heavy loamy soils. *Agricultural Engineering*. 2019. N2 (90). 14-19 (In Russian). EDN: UTZXZN.
 11. Liskin I.V., Mironova A.V. Artificial soil environment justification for laboratory studies of wear and traction characteristics of soil-cutting working bodies. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2020. Vol. 14. N3. 53-58 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-3-53-58.
 12. Akhalaia B.Kh. Improving the technology of harvesting high-quality feed. *Journal of VNIIMZh*. 2009. Vol. 20. N2. 18-122 (In Russian). EDN: NPUEWZ.
 13. Ahalaya B., Shogenov Yu., Starovoytov S. et al. Three-section tillage unit with universal replaceable working bodies. *Bulletin of Kazan State Agrarian University*. 2019. Vol. 14. N3 (54). 92-95. DOI: 10.12737/article_5db9656e2ade23.01560949.
 14. Akhalaya B.Kh., Shogenov Yu.Kh. Automated multifunctional tillage machine. *Russian Agricultural Sciences*. 2017. N6. 55-58 (In Russian). EDN: ZXLBDL.
 15. Zhuk A.F., Shishimorov S.A., Yunusov G.S., Pustotin A.M. Combined agribusiness unit. *Selskiy Mechanizator*. 2017. N8. 8-19 (In Russian). EDN: ZBIXIJ.
 16. Akhalaya B.Kh., Tsench Yu.S. Combined unit for tillage with pulsed shock wave action. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023. Vol. 17. N4. 62-67 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-4-62-67.
 17. Akhalaya B.Kh., Shogenov Yu.Kh., Tsench Yu.S., Kvas S.A. Improved technology for stripe energy resource-saving soil processing. *Machinery Technical Service*. 2018. Vol. 132. 232-237 (In Russian). EDN: VLSWCQ.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Ахалая Б.Х. – разработка конструктивных схем и параметров комбинированного почвообрабатывающего агрегата с универсальными рабочими органами;

Ценч Ю.С. – постановка цели исследования, критический анализ, формирование общих выводов.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Akhalaya B.Kh. – development of design schemes and parameters of the combined soil cultivation unit with universal working tools;

Tsench Yu.S. – formulation of the research objective, critical analysis, and synthesis 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

02.12.2025
18.02.2026



Технические средства и технологии обработки почвы и внесения минеральных удобрений

Юлия Сергеевна Ценч¹,

доктор технических наук, член-корреспондент
Российской академии наук,
главный научный сотрудник,
e-mail: vimasp@mail.ru;

Иван Вадимович Сидоров²,

кандидат сельскохозяйственных наук,
младший научный сотрудник,
e-mail: nit123@yandex.ru

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

²Гжельский государственный университет, Московская обл., Российская Федерация

Реферат. Совершенство техники для внесения минеральных удобрений и химических средств защиты растений является важным условием их эффективности и безопасного применения. (*Цель исследования*) Провести ретроспективный анализ развития технических средств для внесения минеральных удобрений и химической защиты растений. (*Материалы и методы*) Изучили монографии, оригинальные и обзорные научные публикации, техническую документацию с использованием хронологического, генетического и описательного методов. (*Результаты и обсуждение*) Показали, что формирование направлений развития техники для применения минеральных удобрений связано с постепенным освоением разных типов внесения, а опрыскивателей как важнейшего технического средства защиты растений – по мере внедрения разных принципов распыления жидкости. При этом границы между типами и группами сельскохозяйственных машин становятся все более условными. Представили материал о вкладе отечественных ученых и специалистов (А.П. фон Пошмана, А.Е. Зайкевича, Ф.М. Соловья) в совершенствование техники химизации. Выявили присущее как разбрасывателям минеральных удобрений, так и опрыскивателям увеличение параметров ширины захвата, рабочей скорости и производительности по мере углубления химизации. (*Выводы*) Развитие техники для применения минеральных удобрений и химических средств защиты растений происходило от примитивных приспособлений и машин к автоматизированным и автоматическим адаптивным техническим средствам точного земледелия, основанным на широком внедрении цифровых и роботизированных устройств, возможностей искусственного интеллекта. В ближайшей перспективе технический уровень этих групп машин будет связан не столько с коренными конструкционными изменениями, сколько с внедрением идеологии точного земледелия.

Ключевые слова: химизация сельского хозяйства, агроинженерия, минеральные удобрения, пестициды, сельскохозяйственная техника, история техники.

■ **Для цитирования:** Ценч Ю.С., Сидоров И.В. Технические средства и технологии обработки почвы и внесения минеральных удобрений. *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2026. Т. 20. №1. С. 64-71. DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-1-64-71. EDN: GPMAEF.

Scientific article

Machinery and Technologies For Soil Tillage and Mineral Fertilizer Application

Yulia S. Tsench¹,

Dr.Sc.(Eng.), corresponding member of the Russian
Academy of Sciences, chief researcher,
e-mail: vimasp@mail.ru;

Ivan V. Sidorov²,

Ph.D.(Agri.), junior researcher,
e-mail: nit123@yandex.ru

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

²Gzhel State University, Moscow Region, Russian Federation

Abstract. The advancement of equipment used for the application of mineral fertilizers and chemical plant protection products is a key prerequisite for their efficient and safe use. (*Research purpose*) To conduct a retrospective analysis of the development of technical means for the application of mineral fertilizers and chemical plant protection products. (*Materials and methods*) Monographs, original and review scientific publications, and technical documentation were studied using chronological, genetic-

historical, and descriptive methods. (*Results and discussion*) The study shows that the evolution of fertilizer application machinery is associated with the gradual adoption of different application methods, while the evolution of sprayers, as key technical means of plant protection, has progressed alongside the introduction of various liquid spraying principles. At the same time, the boundaries between types and groups of agricultural machines have become increasingly blurred. The contribution of domestic scientists and specialists (A.P. von Poshman, A.E. Zaikevich, F.M. Solovey) to the advancement of chemical application technology is highlighted. A common trend identified for both mineral fertilizer spreaders and sprayers is the increase in working width, operating speed, and productivity accompanying the intensification of agricultural chemicalization. (*Conclusions*) The development of equipment for the application of mineral fertilizers and chemical plant protection products has evolved from primitive devices and machines to automated and adaptive technical systems within the framework of precision agriculture, driven by the widespread adoption of digital and robotic technologies and artificial intelligence. In the near future, the technical advancement of these machine groups will be determined less by fundamental design changes and more by the implementation of the precision agriculture paradigm.

Keywords: agricultural chemicalization, agroengineering, mineral fertilizers, pesticides, plant protection products, agricultural machinery, history of technology.

■ **For citation:** Tsench Yu.S., Sidorov I.V. Machinery and technologies for soil tillage and mineral fertilizer application. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2026. Vol. 20. N1. 64-71 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-1-64-71. EDN: GPMAEF.

Химизация и механизация как направления интенсификации сельского хозяйства неразрывно связаны. Технический уровень машин для внесения любых химических средств является одним из ключевых факторов эффективности их применения. Несмотря на значительные различия основные машины химизации (туковые и комбинированные сеялки, разбрасыватели минеральных удобрений, опрыскиватели) сходны по единой структуре рабочего процесса и задачам технологического процесса на разных этапах развития химизации. В то же время задействованные на внесении различных химических средств технические средства имеют видовую специфику, что отразилось на характере их эволюционного развития.

Цель исследования – ретроспективный анализ развития технических средств для внесения минеральных удобрений и химической защиты растений.

Материалы и методы. При подготовке статьи использовались монографии, оригинальные и обзорные научные публикации, техническая документация. Обработка полученных данных проведена с применением историко-научных (хронологического, генетического и описательного) методов.

Результаты и обсуждение. Развитие техники химизации началось с однооперационных машин, некоторые из них и в ближайшем будущем сохранятся в машинно-тракторном парке страны в силу ценовой доступности, освоенности в производстве и большого числа имеющихся образцов [1]. Однако по мере развития сельского хозяйства стабильно увеличивается востребованность комбинированных и универсальных технических средств, граница между которыми все чаще условна. Как комбинирование, так и универсализация ограничиваются агротехническими сроками выполнения работ и пределами усложнения конструкции, уста-

новленными инженерными и экономическими возможностями. Эволюция комбинированных и универсальных машин происходит в направлении от создания семейств унифицированных машин к техническим средствам, построенным по модульному принципу с возможностью быстрой смены разнообразных рабочих органов (примеры – энергетическое средство самоходной машины химизации ЭСВМ-7 и современное самоходное шасси «Туман»).

Давнее стремление конструкторов и инженеров оптимизировать число операций (в том числе связанных с химической обработкой) служит агроинженерной предпосылкой к целостному пониманию химизации сельского хозяйства. Наглядной иллюстрацией начиная с 1950-х годов является выполнение удобрительными машинами задач по защите растений (гербицидной обработки). Разрабатывались сеялки с одновременным внесением как удобрений, так и гербицидов, модернизировались культиваторы-растениепитатели. Также имеет место встречная тенденция использования машин по защите растений для внесения удобрений [2]. С развитием жидких и гелевых форм агрохимикатов стало возможным использовать для подкормки опрыскиватели и применявшиеся ранее для фумигации почвы инъекторы (в старых изданиях – инжекторы) [3-6]. Тем самым границы между разными группами сельскохозяйственных машин становятся все более условными, происходит их сближение.

Развитие наземных машин для внесения минеральных удобрений происходит по четырем направлениям – эволюционным линиям, появление которых тесно связано с постепенным освоением разных типов внесения (*табл.1*). Появившиеся в начале XX в. авиационные средства (летательные аппараты) представляют самостоятельную ветвь,

Аспект	Содержание
Совершенствование форм (эволюционные линии)	<p><i>Линия разбрасывателей:</i> тележечный разбрасыватель – туковая сеялка – центробежный разбрасыватель – штанговый разбрасыватель (распределитель)</p> <p><i>Линия посевных и посадочных машин:</i> универсальная сеялка – комбинированная туковая сеялка – посадочные машины с туковывсевающими аппаратами</p> <p><i>Линия растениепитателей по жидким удобрениям:</i> гербицидно-аммиачная машина, подкормщик, опрыскиватель, иньектор</p> <p><i>Линия летательных аппаратов:</i> с неподвижным крылом (самолет), винтокрылые (вертолет, дрон)</p>
Автономность	Прицепное орудие – навесное орудие – самоходная машина – автовождение
Перспективы	<p>Сокращение доли центробежных разбрасывателей в пользу штанговых</p> <p>Увеличение внутривспашечного внесения</p> <p>Повышение точности и избирательности дозирования</p> <p>Улучшение обработки границ поля</p> <p>Дальнейшая цифровизация мониторинга и автоматизация операций</p> <p>Цифровые исполнительные системы</p> <p>Применение беспилотной авиации</p>

хотя могут быть рассмотрены как особый аналог самоходного разбрасывателя.

Линия разбрасывателей является старейшей и восходит к первым отечественным проектам машин для внесения удобрений и извести – к так называемой «навозной тележке» А.П. фон Пошмана (1758-1829). По задумке создателя, машина предназначалась для внесения минеральных удобрений, получаемых сжиганием в переносной печи растений, земли и извести. А.П. фон Пошман также сформулировал первые агротехнические требования к удобрительным машинам. Однако сведения о практическом воплощении опередившего время проекта нами обнаружены не были, что объясняется крайне редким применением в России XIX в. минеральных удобрений и не востребоваанностью механизации в рамках крепостного строя.

В середине XIX в. после появления трудов Ю. Либиха в Европе происходит переход от теоретических исследований к реальному массовому производству и применению минеральных удобрений на полях. Родиной специальных туковых сеялок и приспособлений следует считать Великобританию. Первая английская туковая сеялка для внесения сухих удобрений была создана неким Салмсом в середине XIX в. и представляла собой также типичный разбрасыватель без распределительных устройств. В конце XIX в. важным новшеством стало появление цепного туковывсевающего аппарата, а в первой трети XX в. закрепляется разделение машин для внесения минеральных удобрений на туковые сеялки и разбрасыватели (рис. 1).

Наиболее простым вариантом разбрасывателей являются центробежные, до сих пор преобладающие при поверхностном внесении удобрений за счет большой ширины разбрасывания при сравнительно небольших размерах, несложной конструкции,



Рис. 1. Тукокоразбрасыватель TR-1 системы Б.В. Дмитриева (середина 1930-х годов), спроектированный специально для изготовления в хозяйствах

Fig. 1. TR-1 fertilizer spreader of the B.V. Dmitriev system (mid-1930s), designed for on-farm manufacture

надежности рабочего органа и ценовой доступности [7, 8]. Однако наиболее перспективным направлением в области внесения твердых туков остается разработка штанговых машин, обеспечивающих более высокое качество внесения.

Советский опыт показал, что новые конструкторские решения должны подкрепляться созданием в хозяйствах достаточных складских мощностей, гарантирующих строгое соблюдение условий хранения средств химизации. Установлено, что качество химикатов на всей цепочке от завода до склада в хозяйстве оказывает большое влияние не только на эксплуатацию, но и на традиции конструирования [9]. Так, при создании туковых разбросных сеялок зарубежные фирмы применяли звездчатые, шнековые, просеивающие и другие высевающие аппараты, предназначенные только для удобрений с хорошей сыпучестью. В СССР же приоритет отдавался цепным и тарельчатым аппаратам, способным работать и с малосыпучими удобрениями, пре-

обладавшими в отечественном ассортименте. Однако такие аппараты не всегда обеспечивают уменьшение нормы высева, что отрицательно влияет на экономичность и экологичность производства [10]. Наряду с механическими высевальными системами в современной сельскохозяйственной технике все активнее применяются пневматические.

До появления специальных туковых сеялок в Европе вносить удобрения пытались зерновыми разбросными сеялками, что ознаменовало начало механизации с помощью посадочных и посевных машин. Однако ложечные и ячеистые аппараты обычных сеялок забивались удобрениями и не обеспечивали равномерного высева.

Дальнейшее развитие эволюционная линия посадочных и посевных машин получила с появлением комбинированных сеялок в последней трети XIX в. [11]. На пути дальнейшего внедрения удобрений возникли две ключевые проблемы: поиск более эффективной альтернативы разбрасыванию и совмещение операции внесения химиката с его заделкой. Решение их в значительной степени является заслугой отечественных ученых, среди которых особое место занимает имя харьковского агронома и химика А.Е. Зайкевича (рис. 2).

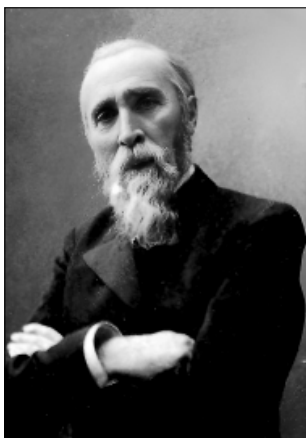


Рис. 2. Профессор Харьковского университета А.Е. Зайкевич (1842-1931)

Fig. 2. Prof. A.E. Zaykevich (1842-1931), Kharkiv University

В 1880-х годах под руководством А.Е. Зайкевича проводились опыты по совмещению посева сахарной свеклы с внесением суперфосфата. Было установлено, что одновременное внесение удобрений с семенами одной сеялкой оказалось менее эффективным, чем высева тука и семян двумя сеялками по отдельности последовательно на разную глубину [12]. Второй способ оказался экономичнее (доза удобрений двукратно сократилась) и несколько выгоднее по урожаю корнеплодов и итоговому количеству сахара с гектара. Можно уверенно утверждать, что формирование научных основ механизированного местного внесения удобрений связа-

но с Россией (хотя аналогичные эксперименты предпринимались и за рубежом). Намного позже, уже во второй половине XX в., линию посевных и посадочных машин, способных вносить минеральные удобрения, дополнили картофелепосадочные машины второго (1947-1958 гг.) и последующих поколений. Также для внесения растворов минеральных удобрений были приспособлены высаживающие аппараты рассадопосадочных машин.

Третья эволюционная линия связана с применением различных почвообрабатывающих машин [13]. В ряде случаев дает результат такой агрономический прием, как совмещение вспашки с внесением удобрений. Еще до Великой Отечественной войны ташкентский завод «Ташсельмаш» им. К.Е. Ворошилова (один из первенцев советского сельхозмашиностроения) освоил выпуск туковых сеялок СУЖ для навески на плуг ТПУ-3 Ростсельмаша. Распространение приема подкормки привело к применению для внесения удобрений в середине 1930-х годов культиваторов, получивших название «растениепитатели» [14]. За создание семейства подобных машин в 1941 г. ветеран ВИМ Ф.М. Соловей (рис. 3) был удостоен Сталинской премии. К концу 1950-х годов появились отечественные конструкции одновременно навесной сеялки и культиватора-растениепитателя технических культур. Развитие техники почвозащитной обработки привело к созданию таких машин, как плоскорез, которые также приспособили для удобрения почвы.



Рис. 3. Изобретатель семейства культиваторов-растениепитателей Ф.М. Соловей (1903-1991)

Fig. 3. F.M. Solovey (1903-1991), inventor of a family of cultivator-fertilizer implements, known as so-called “plant feeders”

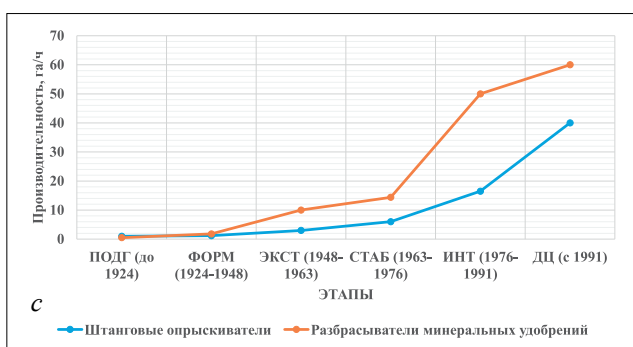
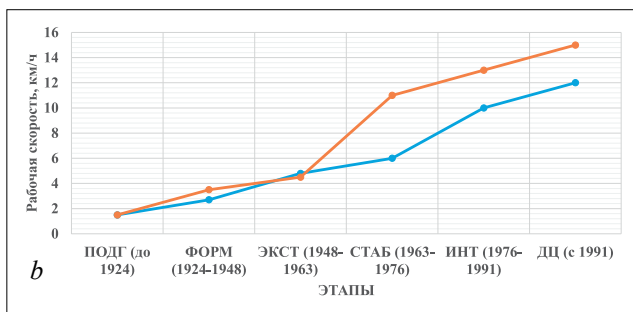
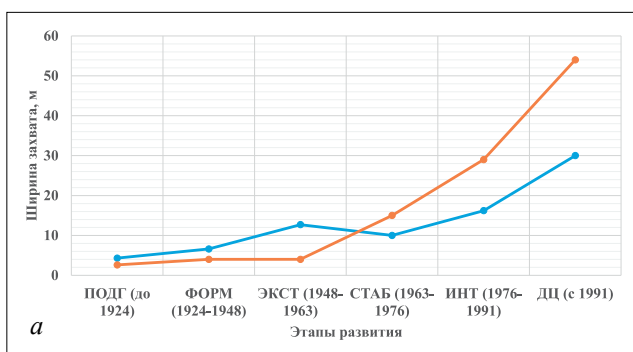
В химической защите растений наиболее значимым приемом остается опрыскивание [15]. По результатам ретроспективного анализа нами были выделены две эволюционные линии развития опрыскивателей в зависимости от принципа распыления жидкости (табл. 2).

Таблица 2		Table 2	
ЭВОЛЮЦИОННЫЕ АСПЕКТЫ РАЗВИТИЯ ОПРЫСКИВАТЕЛЕЙ / EVOLUTIONARY ASPECTS OF AGRICULTURAL SPRAYER DEVELOPMENT			
Аспект	Содержание		
Совершенствование форм (эволюционные линии)	Линия штанговых опрыскивателей: персональные (безранцевые и ранцевые) – полустационарные (тачечные, бочечные) – экипажные и авиационные		
	Линия вентиляторных опрыскивателей		
Автономность	Прицепное орудие – навесное орудие – самоходная машина – автовождение		
Перспективы	Повышение равномерности и точности опрыскивания Гибкое дозирование Улучшение обработки границ поля Переход на ультрамалообъемное опрыскивание (УМО) Широкое внедрение электростатического опрыскивания Увеличение применения беспилотных летательных аппаратов на опрыскивании Широкое внедрение различных инновационных систем Развитие цифровизации мониторинга и автоматизации операций		

Как самый старый тип следует рассматривать штанговые опрыскиватели. Уже к началу XX в. сформировались такие их разновидности, как персональные (перемещаемые и обслуживаемые исключительно одним человеком), полустационарные (нетранспортабельные без использования носилок, тачек и т.п.) и экипажные – смонтированные на повозке. Значительно позже (приблизительно к середине 1940-х годов) были разработаны первые вентиляторные опрыскиватели. По соотношению достоинств и недостатков два типа опрыскивателей во многом аналогичны штанговым и центробежным разбрасывателям [16]. В то же время в связи с появлением комбинированных машин разграничение штанговых и вентиляторных опрыскивателей стало менее явным.

Ограниченность возможностей коренного улучшения опрыскивания стимулировала изыскание в конце 1980-х годов альтернативных способов внесения пестицидов [17, 18]. Был изучен и получил высокую оценку ученых способ местного применения гранулированных препаратов. Однако этот прием не был широко внедрен из-за отсутствия серийного производства сложной специализированной техники. В тот же период появилось контактно-смачивающее опрыскивание (КСО), вопреки названию предполагающее доставку пестицида на растение рабочим органом в виде штанги с пропитанными химикатом пористыми эластичными элементами. В СССР данная технология внесения испытывалась в конце 1980-х годов, однако не получила дальнейшего развития по организационным причинам.

При рассмотрении становления и развития техники химизации сельского хозяйства в России был проведен ретроспективный анализ и оценка эволюции таких рабочих параметров, как ширина захвата, рабочая скорость и производительность на примере разбрасывателей минеральных удобрений и штанговых опрыскивателей (рис. 4). Более подробно периодизация этапов развития технических средств химизации представлена в [19].



Этапы развития: ПОДГ – подготовительный; ФОРМ – формирующий; ЭКСТ – экстенсивный; СТАБ – стабилизационный; ИНТ – интенсивный; ДЦ – децентрализованный

Рис. 4. Изменение ширины захвата (а), рабочей скорости (б) и производительности (с) разбрасывателей туков и штанговых опрыскивателей

Fig. 4. Changes in working width (a), operating speed (b), and productivity (c) of mineral fertilizer spreaders and boom sprayers

Первый график (рис. 4а) отражает неуклонное возрастание ширины захвата у обеих групп машин с течением времени. При этом на подготовительном, формирующем и экстенсивном этапах штанговые опрыскиватели опережали разбрасыватели минеральных удобрений, что объясняется более ранним массовым внедрением защитных работ. Широкозахватные разбрасыватели стали создавать позже по мере развития инфраструктуры, увеличения объемов применения удобрений и совершенствования энергосредств на стабилизационном и интенсивном этапах. Такие машины востребованы и на децентрализованном этапе, особенно в крупных хозяйствах – основных производителях сельхозпродукции.

На рисунке 4б показано изменение рабочей скорости, определяемой возможностями мобильного энергетического средства. Использование конной тяги на операциях удобрения и химической защиты, характерное для подготовительного этапа, продолжилось на формирующем: для более энергоемких операций были необходимы на тот момент еще немногочисленные тракторы. Коренной рост рабочей скорости произошел только после Великой Отечественной войны по мере насыщения хозяйств энергосредствами и обеспечения повышенной мощности новых конструкций. Впоследствии, как видно по более пологому участку графика, интенсивность увеличения рабочих скоростей машин внесения удобрений снизилась: приоритетной стала не столько скорость, сколько ее поддержание.

В защите растений высокая скорость принципиальна также не для всех видов работ либо оправдана только при подходящих свойствах обрабатываемого участка и большом опыте механизаторов.

Параметр производительности технических средств для внесения удобрений и обработки полей агрохимикатами зависит от ширины захвата и значения доступных рабочих скоростей. Изменение производительности на разных этапах показано на рисунке 4с. В дальнейшем изменение данного параметра у всех групп машин будет связано не столько с коренными конструктивными измене-

ниями, сколько с фактором внедрения идеологии точного земледелия, в рамках которой вместо обработки площадей по усредненным показателям оказывается точечное целевое химическое воздействие. К важным факторам относится также интеллектуализация техники.

Сельское хозяйство вслед за промышленностью движется от орудийной и машинной техники к минимизации вовлеченности человека в рабочие процессы. Наиболее ярким примером служит переход к беспилотным системам, уже сегодня выполняющим мониторинг и авиационно-химические работы, а в ближайшем будущем – и наземные операции внесения агрохимикатов и пестицидов [20]. Другой тенденцией в эволюции оборудования для внесения удобрений и средств защиты растений является широкое использование новых материалов (полимеров вместо дерева и металла) и форм энергии (чисто механические конструкции дополняются электрифицированными), повышение энерго- и ресурсоэффективности.

Выводы. Техника химизации сельского хозяйства прошла путь от примитивных приспособлений и машин к автоматизированным и автоматическим адаптивным техническим средствам точного земледелия, основанным на широком внедрении цифровых и роботизированных устройств, искусственного интеллекта. К настоящему времени развитие технических средств характеризуется дальнейшим внедрением комбинированных и универсальных машин, существенным усложнением конструкций, увеличением ширины захвата, повышением производительности, рабочей скорости, точности обработки, оперативности информационного обмена.

Эволюционными факторами перечисленных изменений являются социально-экономические условия, природные особенности России (большие пространства, разнообразие почвенно-агрохимических условий, изобилие недоизученной вредной фауны и пр.), природа используемых химических средств, уровень развития промышленности и сельского хозяйства, а также взаимоотношения в системе «человек-техника».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Воденко К.В., Шейхова М.С., Сафонова С.Г., Бреусова Е.А. Материально-техническая база отечественного АПК: проблемы и перспективы в условиях цифровизации // *Московский экономический журнал*. 2021. N7. С. 221-228. DOI: 10.24411/2413-046X-2021-10443.
2. Шапиро Е.А., Труфляк Е.В., Карпенко В.Д. Методика настройки и организация работы наземных штанговых опрыскивателей // *Политематический сетевой электронный научный журнал КубГАУ*. 2025. N208. С. 334-356. DOI: 10.21515/1990-4665-208-033.
3. Алдошин Н.В. Внесение жидких органических удобрений в технологиях минимальной обработки почвы // *Техника и оборудование для села*. 2025. N10(340). С. 27-30. DOI: 10.33267/2072-9642-2025-10-27-30.
4. Сидоров С.А., Миронов Д.А., Ценч Ю.С., Миронова А.В. Оценка износостойкости и ресурса двухслойных упрочненных почворезущих рабочих органов в различных почвенных условиях // *Инженерные технологии и системы*. 2020. Т. 30. N4. С. 699-710. DOI: 10.15507/2658-4123.030.202004.699-710.

5. Милюткин В.А., Шахов В.А., Асманкин Е.М. и др. Исследования инновационных технологий, техники и жидких минеральных удобрений на основе карбамидно-аммиачной смеси при возделывании сельхозкультур // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2022. N4(96). С. 104-111. DOI: 10.37670/2073-0853-2022-96-4-104-111.
6. Милюткин В.А., Иванов В.А., Попов А.В. Перспективные инновационные техника и технологии для внесения жидких азотных минеральных удобрений КАС // *Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии*. 2022. N1. С. 38-47. EDN: COBVCN.
7. Панферов Н.С., Костенко М.Ю., Тетерин В.С. и др. Разработка центробежного рабочего органа разбрасывателя минеральных удобрений // *Агроинженерия*. 2022. Т. 24. N6. С. 47-53. DOI: 10.26897/2687-1149-2022-6-47-53.
8. Панферов Н.С., Тетерин В.С., Митрофанов С.В. и др. Тенденции развития машин с центробежными рабочими органами для поверхностного внесения твердых минеральных удобрений // *Техника и оборудование для села*. 2021. N12(294). С. 18-24. DOI: 10.33267/2072-9642-2021-12-18-24.
9. Монастырский Д., Куликова М.А., Волчек А. Повышение эффективности сельскохозяйственного производства за счет эффективного применения гранулированных удобрений // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2024. N7(145). DOI: 10.60797/IRJ.2024.145.176.
10. Астахов В.С., Иванчиков Г.О. К вопросу совершенствования способов и машин для дифференцированного внесения твердых минеральных удобрений // *Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии*. 2023. N2. С. 151-155. EDN: AQEGYN.
11. Булавицев Р.А., Головин С.И., Полохин А.М. и др. Эффективность использования минеральных удобрений в качестве подкормки озимой пшеницы // *Вестник аграрной науки*. 2024. N1(106). С. 71-76. DOI: 10.17238/issn2587-666X.2024.1.71.
12. Уткин А.А. Системы удобрения сахарной свёклы // *Сахар*. 2024. N1. С. 20-28. DOI: 10.24412/2413-5518-2024-1-20-28.
13. 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.
14. Васильев А.А., Лисунов О.В., Богиня М.В., Олейникова Е.Н. Совершенствование рабочих органов культиватора для локального внесения минеральных удобрений // *Вестник Омского государственного аграрного университета*. 2022. N1(45). С. 20-29. DOI: 10.48136/2222-0364_2022_1_20.
15. 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.
16. Щеголихина Т.А. Производство штанговых опрыскивателей в России // *АгроФорум*. 2022. N4. С. 28-29. EDN: JVCQJE.
17. Лысов А.К., Корнилов Т.В. Развитие технологий и средств механизации для защиты растений в Российской Федерации // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. N4. С. 100-108. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-4-100-108.
18. Ахалая Б.Х., Старовойтов С.И., Ценч Ю.С. и др. Комбинированный агрегат с универсальным рабочим органом для поверхностной обработки почвы // *Техника и оборудование для села*. 2020. N8 (278). С. 8-11. DOI: 10.33267/2072-9642-2020-8-8-11.
19. Ценч Ю.С., Сидоров И.В. Этапы развития технологий и технических средств для внесения удобрений и защиты растений // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. N3. С. 14-22. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-3-14-22.
20. Лысов А.К., Павлюшин В.А. Фитосанитарное проектирование агроэкосистем и дистанционное зондирование // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2022. Т. 19. N5. С. 101-112. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-101-109.

REFERENCES

1. Vodenko K.V., Sheykhova M.S., Safonova S.G., Breusova E.A. Material and technical base of the domestic agro-industrial complex: problems and prospects in the context of digitalization. *Moscow Economic Journal*. 2021. N7. 221-228 (In Russian). DOI: 10.24411/2413-046X-2021-10443.
2. Shapiro E.A., Truflyak E.V., Karpenko V.D. Setup procedure and the organization of the work of ground rod sprayers. *Polythematic Online Scientific Journal of KubSAU*. 2025. N208. 334-356 (In Russian). DOI: 10.21515/1990-4665-208-033.
3. Aldoshin N.V. Application of liquid organic fertilizers with minimum tillage technologies. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2025. N10(340). 27-30 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2025-10-27-30.
4. 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 conditions. *Engineering Technologies and Systems*. 2020. Vol. 30. N4. 699-710 (In Russian). DOI: 10.15507/2658-4123.030.202004.699-710
5. Milyutkin V.A., Shakhov V.A., Asmankin E.M. et al. Research of innovative technologies, engineering and liquid mineral fertilizers based on carbamide-ammonia mixture for crop cultivation. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2022. N4(96). 104-111 (In Russian). DOI: 10.37670/2073-0853-2022-96-4-104-111.

6. Milyutkin V.A., Ivanov V.A., Popov A.V. Advanced engineering and technology for application of liquid nitrogen chemical fertilizer carbamide-ammonia mixture based. *Bulletin Samara State Agricultural Academy*. 2022. N1. 38-47 (In Russian). EDN: COBBCN.
7. Panferov N.S., Kostenko M.Yu., Teterin V.S. et al. Design of a centrifugal working unit of a mineral fertilizer spreader. *Agricultural Engineering*. 2022. Vol. 24. N6. 47-53 (In Russian). DOI: 10.26897/2687-1149-2022-6-47-53.
8. Panferov N.S., Teterin V.S., Mitrofanov S.V. et al. Trends in the development of machines fitted with centrifugal working bodies for surface application of solid mineral fertilizers. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2021. N12(294). 18-24 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2021-12-18-24.
9. Monastirskii D., Kulikova M.A., Volchek A. Improving the efficiency of agricultural production through the effective use of granular fertilizers. *International Research Journal*. 2024. N7(145). (In Russian). DOI: 10.60797/IRJ.2024.145.176.
10. Astakhov V.S., Ivanchikov G.O. On the improvement of methods and machines for the differentiated application of solid mineral fertilizers. *Bulletin of the Belarussian State Agricultural Academy*. 2023. N2. 151-155 (In Russian). EDN: AQEGYN.
11. Bulavintsev R.A., Golovin S.I., Polokhin A.M. et al. Effectiveness of using mineral fertilizers as feeding for winter wheat. *Bulletin of Agrarian Science*. 2024. N1(106). 71-76 (In Russian). DOI: 10.17238/issn2587-666X.2024.1.71.
12. Utkin A.A. Sugar beet fertilization systems. *Sugar*. 2024. N1. 20-28 (In Russian). DOI: 10.24412/2413-5518-2024-1-20-28.
13. 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.
14. Vasilyev A.A., Lisunov O.V., Boginya M.V., Oleynikova E.N. Improving the working bodies of cultivator for local application of mineral fertilizers. *Vestnik of Omsk SAU*. 2022. N1(45). 20-29 (In Russian). DOI: 10.48136/2222-0364_2022_1_20.
15. 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.
16. Schegolikhina T.A. Rod sprayers production in Russia. *AgroForum*. 2022. N4. 28-29 (In Russian). EDN: JVCQJE.
17. Lysov A.K., Kornilov T.V. Advancements in plant protection technologies and mechanization in the Russian Federation. *Agricultural Machinery and Technologies*. Vol. 18. N4. 100-108 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-4-100-108.
18. Akhalaya B.Kh., Starovoytov S.I., Tsench Yu.S. et al. Combined unit with a universal working body for surface tillage. *Technique and Equipment for Rural Area*. 2020. N8 (278). 8-11 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2020-8-8-11.
19. Tsench Yu.S., Sidorov I.V. Stages of technologies and technical means development for fertilization and plant protection. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N3. 14-22 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-3-14-22.
20. Lysov A.K., Pavlyushin V.A. Phytosanitary design of agroecosystems and remote sensing. *Current problems in remote sensing of the Earth from space*. 2022. Vol. 19. N5. 101-112 (In Russian). DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-101-109.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Ценч Ю.С. – общее руководство, постановка задач исследования, научное редактирование текста статьи;

Сидоров И.В. – анализ предметной области, написание текста и формулирование выводов.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Tsench Yu.S. – overall supervision, formulation of the research objectives, scientific editing of the manuscript;

Sidorov I.V. – subject area analysis, manuscript drafting, and formulation of 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

03.12.2025

25.02.2026



Развитие техники и рабочих органов для приготовления кормов в животноводстве

Михаил Никитьевич Ерохин,
доктор технических наук, профессор,
академик Российской академии наук,
e-mail: n.erohin@rgau-msha.ru;

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. Статья посвящена историческому анализу развития техники и рабочих органов для приготовления кормов. (*Цель исследования*) Выявление ключевых периодов в развитии техники для животноводства и классификация рабочих органов современных смесителей-кормораздатчиков. (*Материалы и методы*) Исследование выполнено на основе историко-научных источников и информационных материалов с использованием аналитического метода. (*Результаты и обсуждение*) В развитии техники для кормопроизводства выделены четыре основных периода: доиндустриальный, первичной механизации, комплексной механизации, автоматизации и роботизации. Технологическая база в доиндустриальный период (до конца XVIII века) ограничивалась ручным трудом. С XIX до середины XX века наблюдается технологический рывок, характеризуемый первичной механизацией орудий и созданием машин с механическим приводом. Начат выпуск серий машин для конкретных операций. На ранних стадиях комплексной механизации кормораздаточной техники (1950-1980-е годы) использовались стационарные и передвижные транспортеры, требовавшие участия персонала. С 1990-х годов развитие технологий сопровождалось применением машин, совмещающих приготовление и раздачу кормов. Технологическая трансформация отрасли с конца XX века по настоящее время происходит в направлении автоматизации и роботизации с использованием интеллектуальных систем, объединяющих точное дозирование, адаптивное смешивание корма и системы технического зрения, обеспечивающие точную раздачу корма. Проведенный анализ современной техники позволил составить классификацию рабочих органов смесителей-кормораздатчиков. (*Выводы*) На основе исторического анализа установлена последовательность четырех технологических периодов. Каждый период характеризовался новым уровнем интеграции и источником применяемой энергии. Развитие рабочих органов происходило по пути совершенствования от простых однофункциональных к комбинированным (шнек-нож). Разработанная классификация рабочих органов смесителей-кормораздатчиков позволяет систематизировать основные конструктивные формы ножей. Необходимость импортозамещения формирует актуальную научно-техническую задачу создания конкурентоспособных отечественных рабочих органов, материалов для них и эффективных упрочняющих технологий.

Ключевые слова: животноводство, техника, развитие техники для приготовления кормов, измельчители, смесители-кормораздатчики, рабочие органы, режущие элементы, ножи.

■ **Для цитирования:** Ерохин М.Н., Скороходов Д.М., Павлов А.С. Развитие техники и рабочих органов для приготовления кормов в животноводстве // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2026. Т. 20. №1. С. 72-80. DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-1-72-80. EDN: HAYETK.

Scientific article

Evolution of Machinery and Working Units for Feed Preparation in Livestock Production

Mikhail N. Erokhin,
Dr.Sc.(Eng.), professor, member of the Russian Academy
of Sciences,
e-mail: n.erohin@rgau-msha.ru;

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 article presents a historical analysis of the evolution of machinery and working units used in feed preparation. (*Research purpose*) To identify the key stages in the development of machinery for feed preparation and distribution and to classify the working units of modern feed mixer-distributors. (*Materials and methods*) The study is based on historical scientific sources and informational materials and applies an analytical method. (*Results and discussion*) The study identifies four main periods in the development of feed preparation technology, in particular, the pre-industrial period, the period of primary mechanization, the period of integrated mechanization, and the period of automation and robotization. During the pre-industrial period (until the end of the 18th century), the technological base was limited to manual labor. From the 19th century to the mid-20th century, a technological breakthrough occurred, characterized by the primary mechanization of tools and the emergence of machines with mechanical drives. This stage marked the beginning of serial production of machines designed for specific operations. In the early stages of integrated mechanization of feed distribution equipment (1950–1980), stationary and mobile conveyors were used, which required the participation of personnel. Since the 1990s, technological development has been associated with the introduction of machines combining feed preparation and distribution functions. From the late 20th century to the present, the technological transformation of the sector has progressed toward automation and robotization, including the use of intelligent systems that integrate precise dosing, adaptive feed mixing, and machine vision technologies to ensure accurate feed distribution. The analysis of modern machinery made it possible to develop a classification of the working units of feed mixer-distributors. (*Conclusions*) The historical analysis revealed four successive technological periods, each characterized by a new level of integration and a different source of applied energy. The development of working units progressed from simple single-function elements to combined designs (auger–knife systems). The proposed classification of feed mixer-distributor working units systematizes the main structural types of knives. The need for import substitution creates an urgent scientific and technical challenge related to the development of competitive domestic working units, suitable manufacturing materials, and effective strengthening technologies.

Keywords: livestock production, machinery, development of feed preparation equipment, crushers, feed mixer-distributors, working units, cutting elements, knives.

■ **For citation:** Erokhin M.N., Skorokhodov D.M., Pavlov A.S. Evolution of machinery and working units for feed preparation in livestock production. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2026. Vol. 20. N1. 72-80 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-1-72-80. EDN: HAYETK.

Развитие техники по приготовлению корма для сельскохозяйственных животных представляет собой последовательную смену от орудий ручного труда до автоматизации технологического процесса. Одновременно совершенствовались рабочие органы, для их изготовления подбирались износостойкие материалы, рассчитывалась конструктивная форма, обеспечивающая оптимальный угол резания. Эволюция проектирования рабочих органов включает множество аспектов. К ним помимо обеспечения прочности и износостойкости [1, 2] относятся коррозионная стойкость, стойкость к ударным нагрузкам и др.

Цель исследования: выявление ключевых исторических периодов в развитии техники для животноводства и классификация рабочих органов современных смесителей-кормораздатчиков.

Материалы и методы. Исследование проведено на основе историко-научных и информационных материалов с использованием аналитического метода и изучения различных источников: научных статей, материалов агропромышленных выставок («Золотая осень», «Агросалон», EuroTier), архивных источников (фотографии), информации официальных сайтов и каталогов компаний – производителей техники для животноводства (*Trioliet Solomix, KUHN, DeLaval, Celikel, Strautmann, Metal-Fach, KobLik Group, PFT, АКМ, KEENAN, РМН* и др.).

Результаты и обсуждение. История развития кормоприготовительной техники для животноводства включает четыре основных периода: доиндустриальный (до конца XVIII в.), первичной механизации (XIX в. – середина XX в.), комплексной механизации (1950-1980-е годы) и автоматизации и роботизации (с 1990 г. по настоящее время).

В доиндустриальный период при приготовлении корма для животных использовался ручной труд и простейшие орудия. Заготовка кормового сырья осуществлялась режущим инструментом (серп, коса), для сбора урожая использовались грабли, а при последующем измельчении применялись ударные и абразивные приспособления: каменные и деревянные ступы с пестом, жернова, тяпки-секачи (*рис. 1*). С их помощью реализовывались базовые физические принципы обработки корма, такие как резание, удар и истирание. Приготовление корма было достаточно трудоемким, а степень измельчения низкая и неравномерная. Качество корма зависело исключительно от навыка рабочего.

С XIX до середины XX века произошел первый технологический рывок в области приготовления кормов, характеризуемый как период первичной механизации. Ручные операции постепенно заменяли устройства с механическим приводом. Появились первые серийно выпускаемые сельскохозяйственные машины, выполняющие более конкретные



Рис. 1. Орудия труда для заготовки и измельчения корма, применяемые до конца XVIII в. (слева направо): серп; коса; грабли (<https://bashenc.online/ru>); мотыга (<http://old.kareliamuseum.ru>); жёрнов; деревянная ступа (<https://ru.pinterest.com>)

Fig. 1. Tools used for harvesting and chopping fodder until the end of the 18th century (from left to right): sickle; scythe; rake (<https://bashenc.online/ru>); hoe (<http://old.kareliamuseum.ru>); quern (hand mill); wooden mortar (<https://ru.pinterest.com>)

операции: корнерезки, соломорезки, зернодробилки, простейшие корне- и клубнемойки (рис. 2), создавались сельскохозяйственные машины с ручным управлением. Ключевым итогом этого этапа стала смена источника энергии – физической силы работника на мощность двигателя.

Совершенствовались рабочие органы машин, их начали изготавливать из закаленной стали, форму и конструкцию приспособляли к измельчению определенных видов корма.

Для грубых кормов применялись устройства ударно-режущего действия – сечкарня (соломорезка). Основным рабочим органом являлся ротор с закрепленными на нем прямыми или слегка изогнутыми ножами (рис. 2а).

Для переработки зерна использовались молотковые и вальцовые зернодробилки. В молотковых зернодробилках (рис. 2б) рабочим органом был ротор со свободно или шарнирно закрепленными молотками, отбивающими зерно о сито. В вальцовых зернодробилках рабочим органом выступала пара встречно вращающихся рифленых вальцов, раздавливающих зерно.

Корнерезки позволили автоматизировать самый трудоемкий процесс приготовления сочных кормов. В качестве рабочего органа в корморезках применялся перфорированный цилиндр с внутренними ножами (рис. 2с) или с насаженными терками.

К середине XX в. ручные операции были полностью механизированы, но организации механического процесса обработки кормов еще не было.

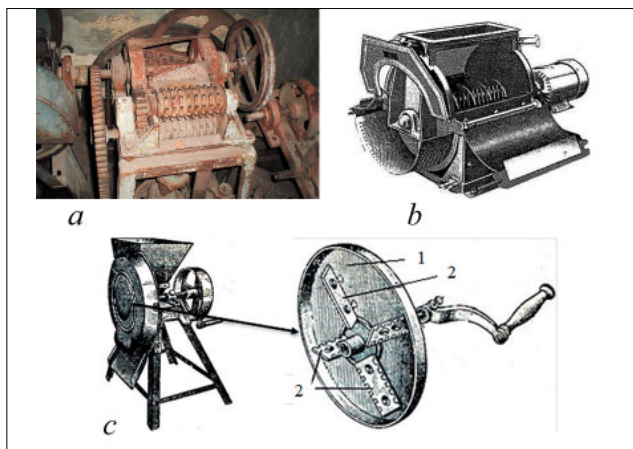


Рис. 2. Сельскохозяйственные машины для заготовки и измельчения корма, применяемые с XIX в. до середины XX в.: а – сечкарня (соломорезка) (<https://infourok.ru>); б – молотковая дробилка (<http://www.fastwood.ru>); в – корнерезка и ее режущий рабочий орган (<http://agrolib.ru>); 1 – перфорированный цилиндр; 2 – гребенчатые ножи

Fig. 2. Agricultural machines used for fodder harvesting and chopping from the 19th century to the mid-20th century: а – chaff cutter (straw cutter) (<https://infourok.ru>); б – hammer mill (<http://www.fastwood.ru>); в – root cutter and its cutting unit (<http://agrolib.ru>); 1 – perforated cylinder; 2 – comb knives

Развитие технических решений в период первичной механизации кормопроизводства концентрировалось на оптимальных конструкциях отдельных рабочих органов (ножа, молотка, вальца), что создало необходимый задел для следующего периода развития – комплексной механизации (1950-1980-е годы), когда в единой машине проходил весь процесс от сырья в поле до готового корма, загруженного в кормушки животных.

Период комплексной механизации (1950-1980-е годы) был обусловлен глобальной интенсификацией сельского хозяйства. Появились крупные промышленные животноводческие комплексы, рассчитанные на содержание сотен и тысяч голов скота. Основная задача в период комплексной механизации как в СССР, так и на Западе состояла в обеспечении резкого роста продуктивности в животноводстве.

На ранних стадиях комплексной механизации для раздачи корма использовались стационарные и передвижные транспортеры, требовавшие значительной доли ручного труда для подачи кормового компонента (рис. 3).

Развитие зоотехнической и инженерной науки в этот период доказало критическую важность сбалансированных рационов и качества измельчения корма для продуктивности животных, в связи с чем требовались сельскохозяйственные машины, способные смешивать грубые, сочные и концентрированные корма и сразу раздавать их. Началось раз-



Рис. 3. Ранний этап комплексной механизации раздачи кормового компонента для КРС (<https://commons.wikimedia.org>): а – передвижной транспортер (1957 г.); б – кормораздаточная лента (1957 г.); в – электрокар с передвижной тележкой (1958 г.); д – кормораздатчик (1960 г.)
 Fig. 3. Early stage of integrated mechanization in cattle feeding systems: а – mobile conveyor (1957); б – feed conveyor belt (1957); в – electric cart with a movable trolley (1958); д – feed dispenser (1960). Source: <https://commons.wikimedia.org>

витие технологий кормораздачи, совмещающих операцию приготовления и раздачи кормов.

В 1960-х годах инженеры в Германии, Нидерландах и США создали мелкосерийные модели прицепных смесителей-раздатчиков кормов, оснащенных простейшими смесительными устройствами (горизонтальные шнеки, ленты со скребками).

В 1975 г. голландская компания *Triolite* запустила серийное производство прицепного смесителя-кормораздатчика с вертикальным шнеком. В СССР первые отечественные измельчители-смесители-раздатчики корма появились в 1970-х годах и были представлены в основном стационарными или прицепными моделями. Некоторые из этих моделей показаны на [рисунке 4](#).

Главным рабочим органом у первых смесителей-кормораздатчиков были горизонтальные шнеки, горизонтальные ленты со скребками и в последующем вертикальные шнеки с лопастями, выполняющие исключительно смесительно-транспортирующую функцию. Для предварительного измельчения корма (сена, соломы) использовались роторные измельчители в самой машине или стационарные измельчители в кормоцехах.

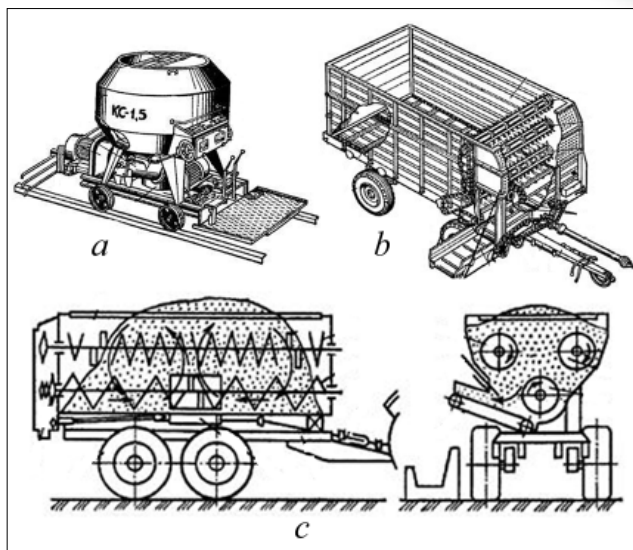


Рис. 4. Стационарные и прицепные кормораздатчики эпохи комплексной механизации (конец 1960-х – 1980-е годы): а – смеситель КСС-1,5; б – универсальный кормораздатчик КТУ-10; в – раздатчик силоса РСЦ-10 (<https://pandia.org>)
 Fig. 4. Stationary and trailed feed distributors of the integrated mechanization era (late 1960s–1980s): а – KCC-1.5 mixer; б – KTU-10 universal feed distributor; в – RSP-10 silage feeder (<https://pandia.org>)

В переходный период (1990-2000-е годы) с целью повышения эффективности и универсальности сельскохозяйственной машины, способной совместить функции смешивания и дробления комков и грубых включений при раздаче корма животным, появились новые инженерные решения. На шнеки или лопасти смесителей-кормораздатчиков устанавливали сменные износостойкие накладки из твердых сплавов (*HARDOX, Strenx*).

Начиная с 2000-х годов в смесители-кормораздатчики стали массово внедряться комбинированные рабочие органы (шнек с интегрированными ножами), выполняющие функцию измельчения. Это позволило исключить из технологического процесса предварительное измельчение на стационарных машинах и привело к возможности выполнения одной сельскохозяйственной машиной трех ключевых операций: измельчение, смешивание и раздача.

С конца XX в. отрасли животноводства и кормопроизводства вступили в фазу технологической трансформации с внедрением автоматизации и роботизации технологических процессов. Для приготовления и раздачи кормов используются интеллектуальные системы, объединяющие точное дозирование, адаптивное смешивание корма и системы технического зрения, обеспечивающие точную раздачу полнорационной кормовой смеси.

Сегодня предлагаются разнообразные модели смесителей-кормораздатчиков с расширенным функ-

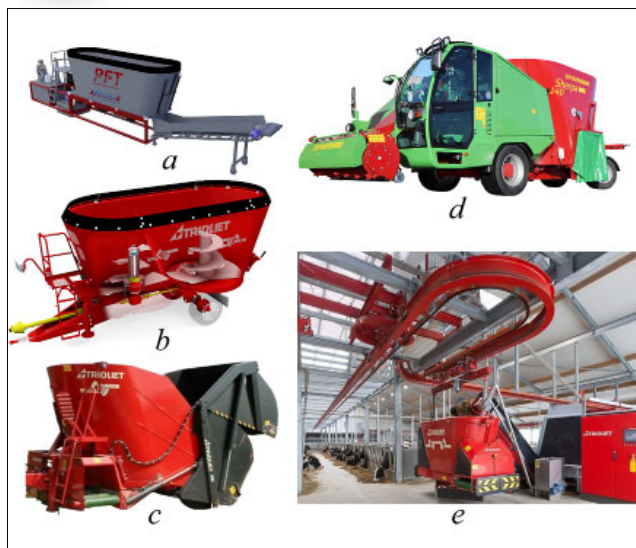


Рис. 5. Современные типы смесителей-кормораздатчиков: а – стационарные; б – передвижные; с – самозагружающиеся; д – самоходные; е – автоматические. Источники: <https://www.trioliet.ru>; <https://pro-ft.ru>; <https://www.straumann.com/ru>; каталоги фирм Trioliet, PFT, Straumann

Fig. 5. Modern types of feed mixer-distributors: a – stationary; b – mobile; c – self-loading; d – self-propelled; e – automatic. Sources: <https://www.trioliet.ru>; <https://pro-ft.ru>; <https://www.straumann.com/ru>; catalogs of Trioliet, PFT, and Straumann

ционалом, различным объемом бункера как для ферм с небольшим поголовьем животных, так и для крупных хозяйств. Основными производителями являются Trioliet Solomix (Нидерланды), KUHN (Франция), DeLaval (Швеция), Celikel (Турция), Straumann (Германия), Metal-Fach (Польша), Koblik Group (Россия, Беларусь), PFT и АКМ (Россия), Faresin (Италия), Keenan (Ирландия), RMH (Израиль) и др.

Модельный ряд машин для кормопроизводства значительно эволюционировал и помимо традиционных (стационарных и прицепных) моделей включает самоходные, самозагружающиеся и автоматические (рис. 5).

Многие смесители-кормораздатчики оснащены дополнительными рабочими органами, позволяющими повысить эффективность технологического процесса. Так, самоходные машины оснащены фрезерным рабочим органом, обеспечивающим загрузку запрессованного корма. Например, у кормораздатчиков KUHN на фрезерном рабочем органе закреплены угловые и треугольные ножи (рис. 6), позволяющие разрезать и измельчать корм в процессе загрузки.

К инновационным разработкам смесителей-кормораздатчиков Faresin модели PF относятся дополнительный рабочий орган – дробилка (рис. 7). Это

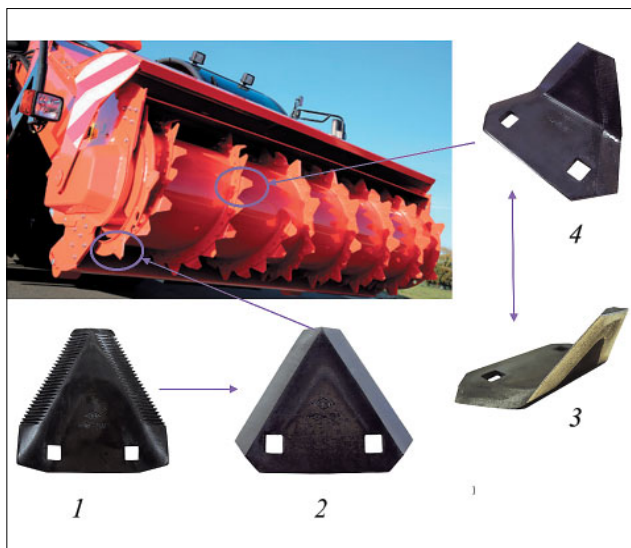


Рис. 6. Фрезерный рабочий орган самоходных смесителей-раздатчиков корма KUHN и используемые на нем ножи: 1 – зубчатый треугольный нож; 2 – треугольный нож; 3 – угловой нож с покрытием карбида вольфрама; 4 – угловой нож. Источник: <https://www.kuhn.ru>, каталоги техники для животноводства фирмы KUHN

Fig. 6. Milling working unit of KUHN self-propelled feed mixer-distributors and the knives used in it: 1 – serrated triangular knife; 2 – triangular knife; 3 – angular knife with tungsten carbide coating; 4 – angular knife. Source: <https://www.kuhn.ru>; KUHN livestock equipment catalogs



Рис. 7. Фреза с дробилкой самоходного смесителя-кормораздатчика Faresin модели PF. Источники: <https://www.faresin.com/ru>, каталоги техники для животноводства фирмы Faresin Industries

Fig. 7. Milling cutter with crusher of the Faresin PF self-propelled feed mixer-distributor. Sources: <https://www.faresin.com/ru>; livestock equipment catalogs of Faresin Industries

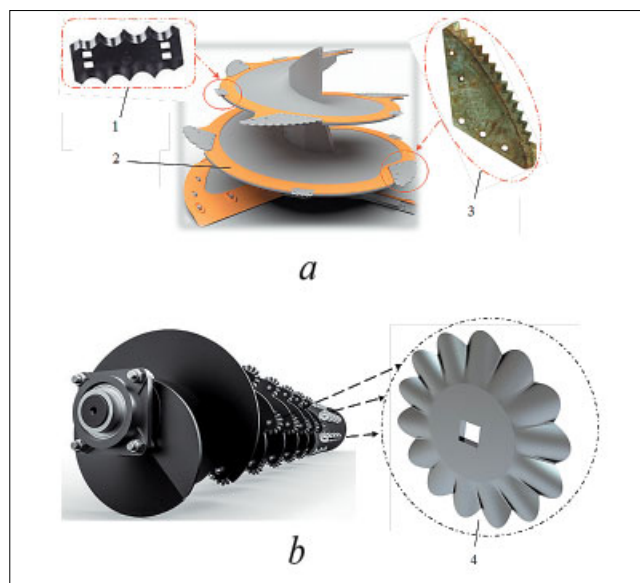


Рис. 8. Рабочие органы смесителей-кормораздатчиков: а – вертикальный шнек смесителя-кормораздатчика Faresin; б – горизонтальный шнек смесителя-кормораздатчика Celikel BRASSUS; 1 – двухсторонний зубчатый нож; 2 – износостойкая лента с лезвием; 3 – зубчатый нож формы лезвия; 4 – звездообразный нож. Источники: <https://www.faresin.com/ru>, <https://celikel.ru/>, каталогов техники для животноводства фирмы Faresin Industries и Celikel

Fig. 8. Working units of feed mixer-distributors: a – vertical auger of a Faresin feed mixer-distributor; b – horizontal auger of a Celikel BRASSUS feed mixer-distributor; 1 – double-sided serrated knife; 2 – wear-resistant strip with blade; 3 – serrated blade-shaped knife; 4 – star-shaped knife. Sources: <https://www.faresin.com/ru>; <https://celikel.ru/>; livestock equipment catalogs of Faresin Industries and Celikel

уникальная режущая конструкция с 128 ножами и тремя рядами ответных лезвий.

Активно начинают применяться на крупных фермах автоматические смесители-кормораздатчики, работающие без участия оператора по заранее установленному алгоритму: получение задания от системы управления фермой – загрузка корма – измельчение – смешивание – движение по маршруту – раздача корма – возврат на станцию. Этот исторический этап завершается переходом от управления машиной к управлению процессом через интерфейс программного обеспечения животноводческим комплексом.

Однако, несмотря на автоматизацию [3] и роботизацию кормоприготовительного процесса, совершенствование смесителей-кормораздатчиков и их рабочих органов, главным рабочим органом остается шнек с интегрированными режущими элементами – ножами (рис. 8).

Проведенный анализ сельскохозяйственной техники для животноводства позволил составить клас-

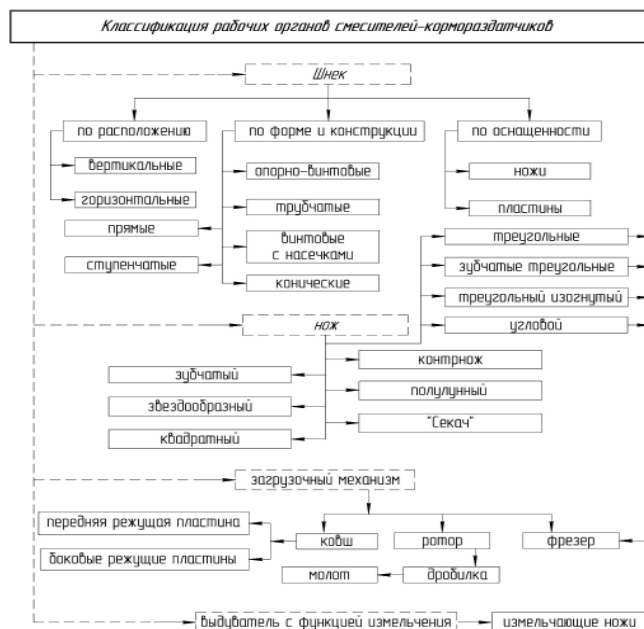


Рис. 9. Классификация рабочих органов современных смесителей-кормораздатчиков

Fig. 9. Classification of working units used in modern feed mixer-distributors

сификацию рабочих органов современных смесителей-кормораздатчиков (рис. 9).

Рабочие органы смесителей-кормораздатчиков подвергаются интенсивному коррозионно-механическому воздействию, абразивному износу при контакте с твердыми включениями в кормовом сырье, ударным нагрузкам, влиянию химически агрессивной среды (кислоты в силосе, влага). В таких условиях функционирования предъявляются исключительные требования к износостойкости материалов и конструкционной прочности деталей.

Согласно данным Министерства сельского хозяйства РФ, по техническому оснащению отрасль животноводства на 95% (2023 г.) зависит от импорта, в том числе рабочих органов. Их приобретение и доставка усложнились с введением санкций, увеличилась стоимость [4].

Отечественная техника по многим показателям, в том числе надежности, уступает машинам ведущих зарубежных фирм. Сельские товаропроизводители несут значительные экономические потери, в структуре себестоимости продукции затраты на ремонт, запчасти и поддержание машинно-тракторного парка в работоспособном состоянии превышают 12%.

Особенно остро стоит вопрос замены импортных рабочих органов отечественными, обладающими высокими износостойкостью и работоспособностью. Для этого необходимы новые материалы и технологии.

Актуальными задачами в области кормопроизводства являются:

- разработка новых упрочняющих технологий [5-7], обеспечивающих повышение износостойкости и коррозионной стойкости рабочих органов машин и оборудования;
- разработка методов и средств [8, 9], позволяющих оценивать эффективность упрочняющих технологий в заданных условиях эксплуатации рабочих органов;
- своевременный контроль качества запасных рабочих органов;
- разработка рекомендаций по своевременной очистке техники от остатков корма и ее сушке;
- разработка модифицированных износостойчивых и коррозионностойких рабочих органов;
- оптимизация процесса резания ножом [10].

Решение этих задачи позволит повысить долговечность рабочих органов машин и оборудования, надежность в целом техники для приготовления кормов.

Следующий этап развития сельского хозяйства, техники и рабочих органов связан с переходом и реализацией концепции «Умное сельское хозяйство» [11, 12]. В этом направлении уже появляются новые разработки [13-16].

Выводы. На основе исторического анализа установлена последовательность основных технологических периодов развития техники для приготовления кормов: доиндустриальный (до конца XVIII в.); первичная механизация (XIX в. – середина XX в.); комплексная механизация (1950-1980 гг.); автоматизация и роботизация (с 1990-х годов по настоящее время). Каждый период характеризовался новым уровнем интеграции и источником энергии.

Развитие рабочих органов происходило по пути их совершенствования, перехода от простых однофункциональных к комбинированным (шнек-нож).

Разработана классификация рабочих органов смесителей-кормораздатчиков, позволяющая систематизировать основные конструктивные формы ножей (треугольные изогнутые и зубчатые, квадратные, изогнутые, полулунные, угловые, секач, зубчатые).

В условиях импортозависимости актуальная научно-техническая задача состоит в разработке конкурентоспособных отечественных рабочих органов, материалов для них и эффективных упрочняющих технологий кормопроизводства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Попов Д.В., Миронов Д.А., Ценч Ю.С. Эволюция проектирования рабочих органов почвообрабатывающих машин // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2025. Т. 19. №3. С. 66-73. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-3-66-73.
2. Катаев Ю.В., Герасимов В.С., Тишанинов И.А., Казакова В.А. Эволюция технического сервиса в агропромышленном комплексе // *Технический сервис машин*. 2024. Т. 62. №3. С. 47-52. DOI: 10.22314/2618-8287-2024-62-3-47-52.
3. Лобачевский Я.П., Дорохов А.С. Цифровые технологии и роботизированные технические средства для сельского хозяйства // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Т. 15. №4. С. 6-10. DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10.
4. Ерохин М.Н., Гайдар С.М., Скороходов Д.М. и др. Износостойкость низколегированных сталей в абразивной среде // *Агроинженерия*. 2023. Т. 25. №3. С. 72-78. DOI: 10.26897/2687-1149-2023-3-72-78.
5. Серов А.В., Серов Н.В., Бурак П.И. Функциональные покрытия // *Электрометаллургия*. 2020. №11. С. 25-33. DOI: 10.31044/1684-5781-2020-0-11-25-33.
6. Ипатов А.Г., Ерохин М.Н., Казанцев С.П. и др. Физико-механические свойства керамических покрытий, получаемых короткоимпульсной лазерной наплавкой порошковой смеси на основе бора // *Агроинженерия*. 2023. Т. 25. №1. С. 71-76. DOI: 10.26897/2687-1149-2023-1-71-76.
7. Ишков А.В., Аулов В.Ф., Рожков Ю.Н., Евсиков А. А. Исследование химического состава покрытий после ТВЧ-наплавки // *Технический сервис машин*. 2025. Т. 63. №1. С. 82-86. DOI: 10.22314/2618-8287-2025-63-1-82-86.
8. 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. №1. С. 97-106. DOI: 10.31857/S0235711924010117.
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. Vol. 53. №1. 80-87. DOI: 10.1134/S1052618824010072.
10. 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. №5(223). С. 70-78. DOI: 10.53083/1996-4277-2023-223-5-70-78.
11. Лысов А.К., Корнилов Т.В. Развитие технологий и средств механизации для защиты растений в Российской Федерации // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. №4. С. 100-108. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-4-100-108.

12. Анищенко А.Н. «Умное» сельское хозяйство как перспективный вектор роста аграрного сектора экономики России // *Продовольственная политика и безопасность*. 2019. Т. 6. N2. С. 97-108. DOI: 10.18334/ppib.6.2.41384.
13. Fedorov A.D., Kondratieva O.V., Slinko O.V. Process of digital transformation of agrarian economy. *Advances in Economics, Business and Management Research*. 2020. 164-169. EDN: SDQPLX.
14. Скороходов Д.М., Казанцев С.П., Серов Н.В., Карпов В.И. Разработка программного модуля для автоматизации процесса упрочнения рабочих органов сельскохозяйственных машин сверхвысокочастотным индукционным нагревом // *Международный технический журнал*. 2025. N4(98). С. 78-89. DOI: 10.34286/29449-4176-2025-98-4-78-89.
15. Ерохин М.Н., Скороходов Д.М., Скороходова А.Н. и др. Анализ современных устройств выращивания растений в городском фермерстве и перспективы его развития // *Агроинженерия*. 2021. N3(103). С. 24-31. DOI: 10.26897/2687-1149-2021-3-24-31.
16. Воронина Н.П. Правовое регулирование использования биотехнологий в сельском хозяйстве России и зарубежных странах // *Аграрное и земельное право*. 2020. N7(187). С. 17-23. EDN: ААМАТV.

REFERENCES

1. Popov D.V., Mironov D.A., Tsench Yu.S. Evolution of the design of working tools for tillage machines. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N3. 66-73 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-3-66-73.
2. Kataev Yu.V., Gerasimov V.S., Tishaninov I.A., Kazakova V.A. Evolution of technical service in the agricultural complex. *Machinery Technical Service*. 2024. Vol. 62. N3. 47-52 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2024-62-3-47-52.
3. Lobachevsky 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.
4. Erokhin M.N., Gaidar S.M., Skorokhodov D.M. et al. Wear resistance of low-alloy steels in the abrasive environment. *Agricultural Engineering*. 2023. Vol. 25. N3. 72-78 (In Russian). DOI: 10.26897/2687-1149-2023-3-72-78.
5. Serov A.V., Serov N.V., Burak P.I. Functional coatings. *Electrometallurgiya*. 2020. N11. 25-33 (In Russian). DOI: 10.31044/1684-5781-2020-0-11-25-33.
6. Ipatov A.G., Erokhin M.N., Kazantsev S.P. et al. Physico-mechanical properties of ceramic coatings obtained by short-pulse laser surfacing of a boron-based powder mixture. *Agricultural Engineering*. 2023. N25(1). 71-76 (In Russian). DOI: 10.26897/2687-1149-2023-1-71-76.
7. Ishkov A.V., Aulov V.F., Rozhkov Yu.N., Evsyukov A.A. Research of the chemical composition of coatings after HF surfacing. *Machinery Technical Service*. 2025. Vol. 63. N1. 82-86 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2025-63-1-82-86.
8. Lyalyakin V.P., Aulov V. F., Ishkov A.V. et al. Study of wear resistance of knives during operation and evaluation of effective methods of their hardening. *Problems of mechanical engineering and reliability of machines*. 2024. N1. 97-106 (In Russian). DOI: 10.31857/S0235711924010117.
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. Vol. 53. N1. 80-87 (In Russian). DOI: 10.1134/S1052618824010072.
10. 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. N5(223). 70-78 (In Russian). DOI: 10.53083/1996-4277-2023-223-5-70-78.
11. Lysov A.K., Kornilov T.V. Advancements in plant protection technologies and mechanization in the Russian Federation. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N4. 100-108 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-4-100-108.
12. Anischenko A.N. "Smart" agriculture as a promising vector of growth of agrarian sector of economy in Russia. *Food Policy and Security*. 2019. Vol. 6. N2. 97-108 (In Russian). DOI: 10.18334/ppib.6.2.41384.
13. Fedorov A.D., Kondratieva O.V., Slinko O.V. Process of digital transformation of agrarian economy. *Advances in Economics, Business and Management Research*. 2020. 164-169 (In Russian). EDN: SDQPLX.
14. Skorokhodov D.M., Kazantsev S.P., Serov N.V., Karpov V.I. Development of a software module for automation of the process of hardening the working bodies of agricultural machinery by ultra-high-frequency induction heating. *International Technical Journal*. 2025. N4 (98). 78-89 (In Russian). DOI: 10.34286/29449-4176-2025-98-4-78-89.
15. Erokhin M.N., Skorokhodov D.M., Skorokhodova A.N. et al. Analysis of using modern plant cultivation units in city farming and its development prospects. *Agrarian Engineering*. 2021. N3 (103). 24-31 (In Russian). DOI: 10.26897/2687-1149-2021-3-24-31.
16. Voronina N.P. Legal regulation of the use of biotechnology in agriculture in Russia and foreign countries. *Agrarian and Land Law*. 2020. N7 (187). 17-23 (In Russian). EDN: ААМАТV.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Ерохин М.Н. – общее руководство, постановка цели и формирование методики исследования;

Скороходов Д.М. – подготовка рукописи, анализ и доработка текста, формирование общих выводов;

Павлов А.С. – обобщение и описание результатов, визуализация материалов, анализ литературных данных, формирование результатов исследования.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Erokhin M.N. – overall supervision, formulation the research objective, development of the research methodology;

Skorokhodov D.M. – manuscript preparation, analysis and revision, formulation of the overall conclusions;

Pavlov A.S. – summarization and description of the results, visualization of materials, literature analysis, formulation of the 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

03.12.2025

27.02.2026

EDN: JMEZTT

DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-1-81-90



Научная статья

УДК 631.3



История становления и развития научных школ по механизации сельского хозяйства Башкирского государственного аграрного университета

Салават Гумерович Мударисов,
доктор технических наук, профессор, академик
Академии наук Республики Башкортостан,
e-mail: salavam@gmail.com;

Андрей Владимирович Неговора,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: negovoraav@gmail.com;
Азамат Фаритович Фаюршин,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: azamatff@yandex.ru

Башкирский государственный аграрный университет, Республика Башкортостан, г. Уфа, Российская Федерация

Реферат. Отметим актуальность изучения истории развития научных школ по направлению механизации сельского хозяйства в региональных университетах, раскрывающей механизмы формирования научных коллективов и трансмиссии знаний в аграрном образовании. (*Цель исследования*) Обобщить историко-научный материал о становлении и развитии научных школ по механизации сельского хозяйства в Башкирском государственном аграрном университете. (*Материалы и методы*) Исследование основано на комплексном анализе источников информации: архивных материалах, данных о защитах диссертаций, опубликованных работах, патентах с применением хронологического, персоналистического, институционального и компаративного подходов за период 1930-2025 годов. (*Результаты и обсуждение*) Выявлены и признаны научные школы, которые формировались вокруг групп лидеров: А.П. Иофинова и С.Г. Мударисова (кафедра сельскохозяйственных машин), Р.М. Баширова и И.И. Габитова (кафедра тракторов и автомобилей), В.С. Ибрагимова, Э.Л. Левина и М.Н. Фархшатов (кафедра технологии металлов и ремонта машин). Каждая научная школа имеет свою специфику развития по объемам фундаментальных и прикладных исследований, инвестициям в лабораторную базу, грантовой поддержке. Методология трансформировалась от классических экспериментов к математическому моделированию, компьютерным симуляциям и современным цифровым двойникам с искусственным интеллектом. (*Выводы*) Научные школы Башкирского государственного аграрного университета продемонстрировали преемственность и адаптивность к технологическим вызовам на протяжении 95 лет. Сочетание научного руководства со стороны выдающихся ученых, государственной поддержки и партнерских отношений с промышленностью способствовало институционализации научных школ, повышению их эффективности в решении современных задач агропромышленного производства.

Ключевые слова: история науки, научная школа, механизация сельского хозяйства, агроинженерия, научные лидеры, инновационные технологии, земледельческая механика, техническое обслуживание и ремонт машин.

■ **Для цитирования:** Мударисов С.Г., Неговора А.В., Фаюршин А.Ф. История становления и развития научных школ по механизации сельского хозяйства Башкирского государственного аграрного университета // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2026. Т. 20. №1. С. 81-90. DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-1-81-90. EDN: JMEZTT.

Scientific article

Historical Analysis of the Establishment and Development of Scientific Schools in Agricultural Mechanization at Bashkir State Agrarian University

Salavat G. Mudarisov,
Dr.Sc.(Eng.), professor, member of the Academy
of Sciences of the Republic of Bashkortostan,
e-mail: salavam@gmail.com;

Andrei V. Negovora,
Dr.Sc.(Eng.), professor,
e-mail: negovoraav@gmail.com;
Azamat F. Fayurshin,
Ph.D.(Eng.), associate professor,
e-mail: azamatff@yandex.ru

Bashkir State Agrarian University, Republic of Bashkortostan, Ufa, Russian Federation

Abstract. The relevance of studying the historical development of scientific schools in the field of agricultural mechanization at regional universities is highlighted, as such studies reveal the mechanisms of scientific team formation and knowledge transmission in agrarian education. (*Research purpose*) To synthesize historical and scientific materials on the formation and evolution of scientific schools in agricultural mechanization at Bashkir State Agrarian University. (*Materials and methods*) The study is based on a comprehensive analysis of information sources, including archival materials from Bashkir State Agrarian University, data on defended dissertations, published papers, and patents. The study employs chronological, personalistic, institutional, and comparative approaches and covers the period from 1930 to 2025. (*Results and discussion*) The study identifies and characterizes scientific schools formed around prominent research leaders: A.P. Iofinov and S.G. Mudarisov (Department of Agricultural Machines); R. M. Bashirov and I.I. Gabitov (Department of Tractors and Automobiles); and V.S. Ibragimov, E.L. Levin, and M.N. Farkshatov (Department of Metal Technology and Machine Repair). Each scientific school demonstrates distinct developmental characteristics with respect to the balance between fundamental and applied research, the level of investment in laboratory infrastructure, and the extent of grant support. Over time, the methodological framework has evolved from classical experimental approaches to mathematical modeling, computer simulation, and contemporary AI-based digital twin technologies. (*Conclusions*) Over a 95-year period, the scientific schools of Bashkir State Agrarian University have demonstrated both continuity and adaptability in response to evolving technological challenges. The synergy of strong scientific leadership, sustained state support, and active collaboration with industry has facilitated the institutionalization of these scientific schools and strengthened their capacity to address current challenges in agro-industrial production.

Keywords: history of science; scientific school; agricultural mechanization; agroengineering; scientific leaders; innovative technologies; agricultural mechanics; machine maintenance and repair.

■ **For citation:** Mudarisov S.G., Negovora A.V., Fayurshin A.F. Historical analysis of the establishment and development of scientific schools in agricultural mechanization at Bashkir State Agrarian University. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2026. Vol. 20. N1. 81-90 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-1-81-90. EDN: JMEZTT.

Изучение истории аграрной науки и образования необходимо для понимания путей развития отечественного сельскохозяйственного машиностроения и подготовки инженерных кадров. Научные школы в университетах становятся не только центрами производства знаний, но и факторами социально-экономического развития регионов, особенно агропромышленного сектора.

Развитие научных школ – это длительный процесс, требующий постоянного совершенствования материально-технической базы, кадрового потенциала и научной коммуникации [1, 2]. В частности, характерные для аграрных научных школ трудности связаны с необходимостью балансирования между фундаментальными исследованиями и прикладными разработками при решении конкретных проблем сельского хозяйства [3, 4].

В российской историографии вопросам становления научных школ уделялось внимание в работах, посвященных отдельным научным направлениям и учреждениям [5-7]. Однако комплексное исследование истории научных школ в области механизации сельского хозяйства в региональных аграрных университетах остается недостаточно разработанным направлением. Требуется детальный анализ конкретных примеров формирования научных коллективов, трансформации исследовательских направлений и интеграции современных технологий [8].

Отечественная механизация сельского хозяйства как научное направление зародилась в начале

XX века [9-11], ее институционализация в структурах аграрного образования произошла в послереволюционный период (1920-1930 гг.) [12]. Башкирский государственный аграрный университет, основанный в 1930 г., стал одним из центров этого процесса на Урале и в Поволжье (Недорезков В.Д., Зиязетдинов Р.М. Башкирский государственный аграрный университет: история и современность. Уфа: Башк. гос. аграр. ун-т, 2000. 236 с.).

Анализ развития научных школ способствует пониманию механизмов формирования научных коллективов и трансмиссии научного знания в системе высшего образования. Исторический опыт научных школ БГАУ может быть полезен при развитии инновационной инфраструктуры других отраслевых вузов при решении проблем интеграции классических и цифровых методов исследований. Сохранение исторического и научного наследия, культуры укрепляет связи поколений.

Цель исследования. Обобщить историко-научный материал о становлении и развитии научных школ Башкирского государственного аграрного университета в области механизации сельского хозяйства.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Исследование основано на комплексном анализе информации:

- документальных источников: архивные материалы БГАУ (протоколы заседаний кафедр, статистические данные о защитах диссертаций, документы о переименовании структурных подразделений, служебная переписка);

- нарративных источников: историческое описание развития кафедр (Башкирский государственный аграрный университет: история в воспоминаниях; сост. И.И. Габитов и др. Уфа: Башкирский ГАУ, 2020. 220 с.), информация о руководителях, выдающихся ученых и этапах развития;

- материальные свидетельства: фотографии учебных лабораторий, оборудования, преподавателей и студентов в разные периоды, позволяющие проследить техническое оснащение и состояние кафедр;

- количественные данные: статистические отчеты о защите диссертаций, количестве опубликованных работ, патентов и авторских свидетельств, численности кадров.

Использовались методы историографии, системного анализа и социальной истории науки. При выделении ключевых периодов развития научных школ БГАУ, их связи с историческими событиями, изменениями в структуре образования и государственной научно-технической политике применен хронологический метод.

При анализе роли выдающихся научных лидеров в формировании направлений исследований, создании научных традиций и воспроизведении научных кадров использовался персоналистический подход, а для анализа трансформации кафедр как структурных единиц, эволюции их материально-технической базы и организационных изменений – институциональный подход. Сравнительный метод позволил сопоставить траектории развития, выявить сходства и различия в становлении трех базовых кафедр. При анализе документальных источников для выделения ключевых тем, периодизации и количественных показателей развития применялся контент-анализ.

Результаты и обсуждение. В исследовании выделены несколько основных этапов, которые в целом охватывают период с 1930 по 2025 г.:

- 1930-1945 гг. – основание и становление кафедр Башкирского сельскохозяйственного института;

- 1945-1965 гг. – послевоенное развитие и укрепление учебной базы;

- 1962-1994 гг. – эра научных лидеров А.П. Иофинова и Р.М. Баширова, формирование первых признанных научных школ;

- 1995-2007 гг. – переходный период и реструктуризация кафедр;

- 2008-2025 гг. – современный этап развития с внедрением цифровых технологий и интеграцией в глобальные научные сообщества.

Кафедра сельскохозяйственных машин

Первоначальное название – кафедра механизации сельского хозяйства, современное – кафедра мехатронных систем и машин аграрного производства.

Основание и ранний период (1930-1938 гг.). Ка-

федра механизации сельского хозяйства была одной из первых пяти кафедр Башкирского сельскохозяйственного института. С 1931 по 1936 г. заведовал кафедрой инженер, имевший опыт преподавания, Геннадий Александрович Марковский. Учебный процесс был организован в условиях минимального оснащения и отсутствия специализированной материально-технической базы.

В 1936-1938 гг., когда кафедрой заведовал Владимир Львович Жуковский, это было небольшое подразделение, занимавшее одну комнату и не имевшее в штате преподавателей с учеными степенями. Но даже в таких скромных условиях закладывались основы научного подхода к изучению механизированных сельскохозяйственных процессов.

Период развития (1938-1961 гг.): под руководством З.М. Яшина. С приходом в 1938 г. профессора Захария Михайловича Яшина (1885-1965) начался новый этап истории кафедры. Назначение на эту должность известного специалиста в области земледельческой механики, прошедшего серьезную научную подготовку в Воронежском и Ленинградском сельскохозяйственных институтах, с опытом работы на машиноиспытательной станции преследовало цель укрепления кадров в области механизации аграрного производства.

Это был период расширения штата и улучшения учебно-методического обеспечения. В 1950 г. З.М. Яшин становится организатором и деканом факультета механизации сельского хозяйства БСХИ. В 1951 г. кафедра механизации сельского хозяйства была переименована в кафедру сельскохозяйственных машин. Были приглашены молодые инженеры Ф.Г. Плохов, Ю.В. Поздняков, Н.П. Галкин, А.Г. Мазова, Н.И. Рыбаков. Однако кафедра по-прежнему занимала одну комнату.

Научная деятельность предполагала изучение процессов, выполняемых сельскохозяйственными машинами, и применение теории механики к проектированию почвообрабатывающих орудий. Исследования З.М. Яшина базировались на экспериментальных методах, в том числе испытаниях на месте его прежней работы – машиноиспытательной станции. Эти работы заложили фундамент для изучения последователями Захария Михайловича взаимодействия рабочих органов машин с почвой.

Становление научной школы (1962-1994 гг.): эра А.П. Иофинова. В 1962 г. кафедру возглавил Август Павлович Иофинов (1932-2005), прошедший научную подготовку в Ленинградском СХИ, с трехлетним опытом работы на целине главным инженером машинно-технической станции в Кустанайской области Казахской ССР. В 1962 г. А.П. Иофинов закончил аспирантуру при Ленинградском СХИ, его научным руководителем был известный ученый в области инженерии и механики сельскохозяйствен-

ной техники А.Б. Лурье [4].

Под руководством А.П. Иофинова началась радикальная трансформация кафедры сельскохозяйственных машин. Знаменательным стал 1963 г., когда институт переехал в новый корпус. Для оснащения кафедры приобретались вычислительная техника, лабораторное оборудование и измерительные приборы (рис. 1).

При кафедре был построен почвенный канал,



Рис. 1. Профессор А.П. Иофинов и Э.В. Хангильдин анализируют первую созданную в БСХИ программу для ЭВМ, 1973 год

Fig. 1. Professor A.P. Iofinov and E.V. Khangildin during the analysis of the first computer program developed at BSHI (1973)

организованы специализированные лаборатории автоматизации, машин послеуборочной обработки зерна, почвообрабатывающих и посевных машин, кормо- и зерноуборочной техники.

Проводилась масштабная научно-исследовательская работа. На основе результатов комплексных исследований различных сельскохозяйственных машин сформировалась общая теория оперативного управления работой мобильных средств и качеством технологических операций. Изменилась методология от аналитических подходов в исследовательской работе к математическому моделированию и компьютерным технологиям [7].

Благодаря деятельности А.П. Иофинова по привлечению специалистов и единомышленников постепенно сформировалась научная школа «Исследование рабочих процессов сельскохозяйственных машин, статистической динамики и моделирования механизированных технологических процессов, управление качеством работы». Проблематика исследований охватывала актуальные в разные годы направления: совершенствование систем автоматического управления почвообрабатывающими

машинами, разработка систем автовождения свеклоуборочных комбайнов (совместно с Днепропетровским комбайновым заводом), совершенствование посевных машин для почвозащитной технологии, рекультивация земель после строительства трубопроводов большого диаметра и др.

Примечательным достижением стала разработанная А.П. Иофиновым уникальная компьютерная программа AGROTEKA, позволявшая имитировать процесс развития растений на поле в течение вегетационного периода и прогнозировать урожайность. В 1970-х годах это была передовая технология интеграции биологической информации с компьютерными моделями, по сути, ранний прототип систем математического моделирования и прогнозирования в сельском хозяйстве.

Под руководством профессора А.П.Иофинова кандидатами наук стали 14 его учеников, была защищена одна докторская диссертация. А.П. Иофинов автор более 150 научных работ, 15 изобретений.

Современный период (с 1997 г. по настоящее время): под руководством С.Г. Мударисова. В 1997 г. кафедру сельскохозяйственных машин возглавил Салават Гумерович Мударисов (рис. 2).



Рис. 2. Профессор С.Г. Мударисов

Fig. 2. Professor S.G. Mudarisov

В 2011 г. С.Г. Мударисову присвоено ученое звание профессора, в 2018 г. он избран членом-корреспондентом, в 2024 г. – академиком Академии наук Республики Башкортостан. В том же году ему присвоено почетное звание «Заслуженный деятель науки Республики Башкортостан». С.Г. Мударисов – автор более 350 научных работ, из них 8 монографий, 8 рекомендаций производству, 57 патентов на изобретение и полезную модель, более 200 публикаций в периодических научных изданиях.

Под руководством профессора С.Г. Мударисова защищено 5 докторских и 15 кандидатских диссертаций. Всего на базе научной школы кафедры выполнены 9 докторских и 38 кандидатских диссер-

тационных работ.

Традиции научной школы, основанной А.П. Иофиновым, сохраняются и укрепляются. К основным достижениям относятся: разработка и создание моделей и цифровых двойников технологических процессов сельхозмашин на основе методов вычислительной гидродинамики, конечных и дискретных элементов, математических моделей работы пневматических систем зерновых сеялок, зерноочистительных машин на основе уравнений динамики двухфазных сред, позволяющие сократить время и стоимость разработки новой техники на 30-50%.

Современная кафедра мехатронных систем и машин аграрного производства располагает машинным залом, семью специализированными лабораториями и почвенным каналом. Организованы специализированные лаборатории совместно с зарубежными и отечественными партнерами – производителями сельхозтехники. В 2024 г. открылась лаборатория «Искусственный интеллект в АПК», созданная совместно с промышленным партнером Группой компаний «ТАВРОС» в рамках реализации программы академического лидерства «Приоритет-2030».

В настоящее время на кафедре работают три доктора наук (С.Г. Мударисов, Э.Р. Хасанов, И.М. Фархутдинов), пять кандидатов наук, проходят обучение 10 аспирантов и три докторанта.

Кафедра мехатронных систем и машин более чем за 90 лет прошла путь от небольшого учебного подразделения до ведущего научно-образовательного центра в области механизации сельского хозяйства. Научная школа, созданная профессором А.П. Иофиновым и продолжаемая академиком АН Республики Башкортостан С.Г. Мударисовым, успешно интегрирует традиционные методы исследований с современными технологиями цифрового моделирования, вносит свой вклад в развитие сельскохозяйственного машиностроения и подготовку специалистов для агропромышленного комплекса страны.

Кафедра «Тракторы и автомобили»

Современное название – кафедра мобильных энергетических и транспортных средств.

Период становления (1954-1966): под руководством профессора А.П. Ланге. Кафедра «Тракторы и автомобили» была образована в 1953 г., когда студенты факультета механизации сельского хозяйства первого набора перешли на четвертый курс. Первоначально размещалась в двух учебных лабораториях, в ее составе было три преподавателя. Первым заведующим был доцент Шариф Муллаянович Фаршатов. Через год кафедру возглавил профессор Александр Петрович Ланге (рис. 3), кан-



*Рис. 3. Профессор А.П. Ланге (1896-1976)
Fig. 3. Professor A.P. Lange (1896-1976)*

дидат технических наук с многолетним опытом руководителя учебными, научными и производственными коллективами.

А.П. Ланге окончил Киевский политехнический институт. Работая на различных должностях, он совмещал инженерную деятельность с преподаванием в политехническом, машиностроительном, индустриальном, авиационном и сельскохозяйственном институтах. В 1932 г. Александру Петровичу было присвоено звание профессора кафедры двигателей внутреннего сгорания Киевского политехнического института. Ланге А.П. заложил методологические основы исследований автотракторной техники, еще в довоенный период издал несколько книг, ставших практическими руководствами для промышленности. Учебное пособие «Автотракторные двигатели. Устройство двигателей и их конструкция» получило международное признание и было переведено на немецкий язык.

В 1938 г. по ложному обвинению А.П. Ланге был репрессирован и 6 лет провел в исправительных лагерях. В 1944 г. вернулся к научно-педагогической деятельности, до 1952 г. был руководителем кафедры «Автомобили и тракторы» в Алтайском машиностроительном институте, в 1949 г. защитил кандидатскую диссертацию в Киевском сельскохозяйственном институте.

В 1953 г. Александра Петровича пригласили в Башкирский сельскохозяйственный институт заведующим кафедры «Тракторы и автомобили», которую возглавлял до 1966 г. Благодаря усилиям А.П. Ланге кафедра стала одной из лучших в СССР по технической оснащенности и кадровому потенциалу. Под его руководством произошло становление кафедры, открытие аспирантуры по специальности «Автотракторные двигатели» существенно укрепило кадровый состав всего факультета механизации БСХИ. Совместно с машиностроительны-

ми заводами были созданы новые учебные и научные лаборатории, из выпускников института сформировался преподавательский состав, ставший стержнем кафедры на многие годы.

В 1962 г. ВАК восстановил звание профессора А.П. Ланге, в 1969 г. он получил почетное звание «Заслуженный деятель науки БАСССР», в 1970 г. награжден медалью «За доблестный труд». Александр Петрович всегда был образцом профессиональной компетентности, при этом удивительно простым и доступным руководителем, настоящим интеллигентом, воплощением лучших качеств педагога.

Период развития (1967-2000 гг.): под руководством Р.М. Баширова. Профессор Радик Минниханович Баширов (р. 1935) известен как выдающийся ученый, внесший значительный вклад в развитие научных основ конструирования и эксплуатации автотракторной техники (рис. 4). Первым местом работы Р.М. Баширова после окончания механического факультета БСХИ был Ногинский завод топливной аппаратуры. Затем Радик Минниханович по направлению БСХИ поступил в аспирантуру при Центральном научно-исследовательском дизельном институте (г. Ленинград). После защиты в Ленинградском кораблестроительном институте кандидатской диссертации на тему «Исследование односекционных топливоподающих систем аккумуляторного типа» Радик Минниханович вернулся в Башкирский сельскохозяйственный институт на должность старшего преподавателя кафедры тракторов и автомобилей. В 1967 г. был избран заведующим кафедрой, в 1971 г. деканом факультета механизации сельского хозяйства, в 1973 г. проректором по научной работе, а в 1988 г. ректором родного института. Он более 40 лет трудился на кафедре, формируя сплоченный коллектив, определивший ее высокий статус среди вузов страны.

Годы руководства кафедрой Р.М. Башировым стали периодом интенсивного развития материально-технической базы и становления научной школы «Совершенствование конструкции, эксплуатации и ремонта топливных систем автотракторных дизелей». Опыт, полученный в конструкторском отделе Ногинского ЗТА, предопределил исследовательское направление развития кафедры. Радик Минниханович создал и внедрил в производство гибкий привод регулятора дизелей (1968), роторный автомат контроля плотности нагнетательных клапанов (1969), автоматический пусковой обогатитель топливоподачи (1970). Под его началом были разработаны основы теории и расчета аккумуляторных топливных систем (1964-1980) и другие инновационные направления.

Знаменательным событием 1976 года стал переезд кафедры на новую площадку в новом учебном корпусе, началось масштабное обновление учебных и исследовательских лабораторий. Были при-



Рис. 4. Профессор Р.М. Баширов

Fig. 4. Professor R.M. Bashirov

обретены мощностной стенд для испытания тракторов, тормозной стенд для испытания двигателей внутреннего сгорания, испытательные стенды для топливной аппаратуры дизелей и электрооборудования автотракторной техники, большое количество лабораторного оборудования и измерительных приборов. Все это придало новый импульс научно-исследовательской работе коллектива, что позволило существенно повысить квалификацию профессорско-преподавательского состава кафедры. Под руководством Р.М. Баширова было подготовлено 4 доктора и 20 кандидатов технических наук.

Профессор в 1982 г. защитил докторскую диссертацию и создал научную школу, получившую название «Технологии и средства технического сервиса автомобилей, тракторов и мобильной сельскохозяйственной техники». Радик Минниханович был избран членом-корреспондентом Академии наук Республики Башкортостан.

Р.М. Баширов автор более 250 научных работ, включая 10 монографий, 3 учебника, 6 учебных пособий и 23 изобретений. Заслуги Р.М. Баширова отмечены орденом «Знак почета», знаком «Отличник социалистического сельского хозяйства СССР», другими государственными и ведомственными наградами, званиями заслуженного деятеля науки Республики Башкортостан и Российской Федерации, почетного работника высшего профессионального образования РФ.

Период трансформации научной школы: под руководством И.И. Габитова. С 2001 по 2005 г. кафедрой заведовал заслуженный деятель науки Республики Башкортостан, доктор технических наук, профессор Илдар Исмагилович Габитов (рис. 5). Свою научную деятельность он начал под руководством профессора Р.М. Баширова в 1989 г. и прошел все ступени развития как ученого от аспиранта до профессора.

Илдар Исмагилович провел качественную транс-



Рис. 5. Профессор И.И. Габитов
Fig. 5. Professor I. I. Gabitov

формацию научной школы, основанной Р.М. Башировым, сохраняя и укрепляя классический фундамент инновационными направлениями исследований, и до настоящего времени осуществляет руководство научной школой.

Лично И.И. Габитовым были открыты новые научные направления по электронным средствам диагностики и технического обслуживания топливной аппаратуры, технологиям технического сервиса современных отечественных и импортных сельскохозяйственных тракторов и комбайнов, а также реализации инновационных машинных технологий в растениеводстве с использованием собственных разработок. Эти направления органично вписались в глобальную тенденцию цифровизации автотракторной техники, усилив позиции школы в авангарде отраслевого научного сообщества.

Профессор И.И. Габитов является председателем диссертационного совета 35.2.004.05 при Башкирском государственном аграрном университете по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата технических наук. Им подготовлены доктор и 12 кандидатов технических наук. Илдар Исмагилович является главным редактором научного журнала «Вестник Башкирского государственного аграрного университета». Удостоен звания заслуженного деятеля науки Республики Башкортостан, заслуженного работника высшей школы РФ, в 2024 г. награжден орденом Салавата Юлаева.

Современный период: под руководством А.В. Неговора. С 2005 по 2012 г. и с 2024 г. по настоящее время кафедрой руководит доктор технических наук, профессор Андрей Владимирович Неговора (рис. 6). После окончания с отличием Томского инженерно-строительного института и службы в рядах Советской Армии он в 1993 г. начал работать на кафедре «Тракторы и автомобили» и прошел путь от учебного мастера до профессора и директора Института инновационного развития БГАУ.

Андрей Владимирович подготовил одного доктора и 10 кандидатов технических наук. В 2014 г. удостоен звания заслуженного работника транспорта Республики Башкортостан, в 2024 г. заслуженного работника транспорта Российской Федерации, является член-корреспондентом Российской инженерной академии по направлению «Машиностроение».



Рис. 6. Профессор А.В. Неговора
Fig. 6. Professor A.V. Negovora

А.В. Неговора с 2004 г. является соруководителем кафедральной научной школы. На современном этапе научные исследования посвящены улучшению технического сервиса автотракторной техники, совершенствованию конструкции топливоподающих систем дизелей, проблемам тепловой подготовки автомобилей. Разработаны и внедрены в производство конструкции электронно-управляемых топливоподающих систем, обеспечивающих повышение эксплуатационных показателей работы дизеля, средства диагностики и экспериментального исследования процессов топливоподдачи с регистрацией и автоматизированной обработкой данных на ЭВМ.

Сейчас костяк научной школы составляют 10 штатных сотрудников университета, включая профессоров И.И. Габитова, А.В. Неговора, восемь доцентов. На кафедре действуют пять научных лабораторий, оснащенных наукоемким оборудованием и испытательными стендами. При кафедре функционируют три малых инновационных предприятия, что позволяет быстро внедрять научные разработки в производственный процесс и получать обратную связь от экспертов. Среди них лаборатория диагностики и испытания топливоподающих систем, проблемная лаборатория газомоторного и альтернативных видов топлива, лаборатории автотроники и фирменного сервиса, энергонасыщенных тракторов «Кировец», лаборатория «Силовые приводы электромобилей».

За 60 лет деятельности кафедры защитили диссертацию на соискание ученой степени 8 докторов и 43 кандидата технических наук.

Кафедра технологии материалов и реновации машин

Эта кафедра имеет сложную историю, поскольку тематика исследований ей была передана от других кафедр. Ее предшественница – кафедра «Эксплуатация и ремонт машинно-тракторного парка», организованная в 1955 г. при факультете механизации сельского хозяйства.

Кафедра технологии металлов была образована в 1959 г. и по 1960 г. ею руководил кандидат технических наук, доцент Владик Нуртдинович Сафиуллин. В 1960-1968 гг. кафедре возглавлял кандидат технических наук, доцент Гиндулла Самигуллович Трофимов.

Период развития (1967-1988 гг.): под руководством В.С. Ибрагимова и Э.Л. Левина. В 1967 г. была создана кафедра ремонта машин, ее первым заведующим до 1976 г. был Виль Султанович Ибрагимов (рис. 7).



Рис. 7. Профессор В.С. Ибрагимов (в центре) проверяет качество наплавки кулачков распределительного вала на Давлекановском РТП, 1988 год

Fig. 7. Professor V.S. Ibragimov (center) inspects the quality of camshaft lobe hardfacing at the Davlekanovo Repair and Technical Enterprise, 1988

Кандидат технических наук, профессор В.С. Ибрагимов (1929-1995) сыграл ключевую роль в становлении научной школы «Разработка ресурсосберегающих технологий восстановления и упрочнения деталей машин». Совместно с коллегами Г.С. Трофимовым, Э.Л. Левиным, М.А. Кагармановым, М.М. Сафаровым, У.С. Вагаповым был разработан и внедрен на производстве комплекс передовых технологий, в частности, устройства и технологии упрочнения деталей с применением высокочастотного нагрева и термомеханической обработки, технологии электроконтактной приварки различных присадочных материалов.

За годы руководства В.С. Ибрагимова формировалась прочная база для дальнейшего развития научной школы по восстановлению и упрочнению деталей машин. Применение высокочастотного нагрева (ТВЧ) для упрочнения поверхностных слоев деталей машин решало критическую проблему по-

вышения износостойкости и надежности отечественной сельскохозяйственной техники. В результате твердость поверхностного слоя увеличилась на 30-50%. Термомеханическая обработка деталей позволяла достигать лучших свойств, чем использование отдельных методов. Виль Султанович Ибрагимов автор более 100 печатных работ и 18 авторских свидетельств на изобретения, заслуженный деятель науки Башкирской АССР.

Приход на кафедру в 1967 г. Эрнеста Львовича Левина (1933-2021) ознаменовал начало нового этапа развития. После окончания Уфимского авиационного института в 1957 г. и обучения в аспирантуре Э.Л. Левин защитил в 1968 г. диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Им разработаны технологические основы эффективных ресурсосберегающих способов восстановления и упрочнения деталей, включая особо сложные, тяжелонагруженные и крупногабаритные детали тракторов, автомобилей, металлообрабатывающего и нефтехимического оборудования. Практическое внедрение научных разработок на ремонтных предприятиях АПК позволяли увеличить ресурс восстановленных деталей при одновременном снижении на 40-50% затрат на их восстановление. Под руководством Э.Л. Левина с 1966 г. внедрено более 110 разработок на предприятиях СССР, часть была экспортирована. Профессор Э.Л. Левин автор 112 печатных работ, 3 авторских свидетельств на изобретения.

Современный период развития. В 1999 г. кафедру возглавил профессор, доктор технических наук Марс Нуруллович Фархшатов (рис. 8), заслуженный работник сельского хозяйства Республики Башкортостан, заслуженный работник высшей школы Российской Федерации, руководит научной школой «Разработка ресурсосберегающих технологий восстановления и упрочнения деталей машин». За предложенную технологию восстановления деталей типа «вал» для машин и оборудования перерабатывающих отраслей АПК электроконтактной приваркой ленты из коррозионностойких сталей М.Н. Фархшатов награжден серебряной медалью ВДНХ СССР. Марс Нуруллович подготовил одного доктора и 6 кандидатов наук.

На базе научной школы защищены две докторские и 23 кандидатские диссертации. Сотрудниками кафедры опубликовано свыше 800 научных работ, более 50 авторских свидетельств и патентов на изобретения.

В настоящее время кафедрой заведует кандидат технических наук, доцент Азамат Фаритович Фаюршин. После окончания в 1996 г. Башкирского государственного аграрного университета он обучался в аспирантуре при кафедре под руководством профессора М.Н. Фархшатова. Исследовательская работа А.Ф. Фаюршина связана с вопросами упрочнения и восстановления рабочих органов сельскохозяйственных ма-



Рис. 8. Профессор М.Н. Фархшатов
Fig. 8. Professor M.N. Farshatov

шин. Им опубликовано более 150 научно-методических работ, получено 10 патентов на изобретение.

Научная школа, основанная В.С. Ибрагимовым, продолжает функционировать, адаптируясь к современным вызовам, в том числе развитию аддитивных технологий и цифровых методов контроля качества.

Выводы. Анализ истории трех кафедр БГАУ позволяет выделить ключевые факторы, обусловившие успешное развитие научных школ.

- Формирование вокруг выдающихся лидеров, обладающих высоким научным авторитетом и организаторскими способностями. Эти лидеры не только проводили оригинальные исследования, но и создавали исследовательские традиции, воспроизводили научные кадры через подготовку аспирантов и докторантов, привлечение молодых талантливых ученых, развивали материально-техническую базу.

- Долгосрочная приверженностью развитию научного направления научных школ БГАУ обеспечила подготовку 19 докторов и 104 кандидата наук.

- Все кафедры прошли путь от скромного оснащения к современным лабораториям. Сотрудничество с промышленными партнерами позволяет формулировать актуальные научные задачи, внедрять разработки в практику, обеспечивать техническую базу учебного процесса, привлекать внебюджетное финансирование научных исследований.

- Государственная поддержка через получение грантов Российского научного фонда, задания министерств сельского хозяйства России и Республики Башкортостан, программу стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

- Баланс между фундаментальными исследованиями (разработка теорий и моделей) и прикладными разработками (создание технологий и машин) позволяет сохранять научный авторитет при решении практических задач.

Траектория трансформации методологии научной деятельности от классических экспериментальных методов к математическому моделированию, компьютерным симуляциям, цифровым двойникам и искусственному интеллекту показывает способность научных школ адаптироваться к технологическим вызовам, изменению политической системы, экономических условий и технологической среды, на протяжении 95 лет сохраняя свой научный авторитет и практическую значимость.

Современное развитие научных школ БГАУ должно быть направлено на углубление интеграции с цифровыми технологиями, расширение международного сотрудничества, развитие междисциплинарных подходов и системы наставничества для укрепления кадрового потенциала через подготовку аспирантов и докторантов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шапка В.В., Бобров Ф.А. Научная школа как социальный институт в РФ // *Наука. Мысль: электронный периодический журнал*. 2015. Т. 5. №5. С. 58-71. EDN: UZGDSH.
2. Грезнева О. Научные школы: принципы классификации // *Высшее образование в России*. 2004. №5. С. 42-48. EDN: NGOIZN.
3. Стукач В.Ф., Шумакова О.В. Приоритеты научных школ аграрного вуза: востребованность и потенциал для развития // *Управление образованием: теория и практика*. 2022. №5(51). С. 101-114. DOI: 10.25726/a4962-4537-2787-t.
4. Ценч Ю.С. Роль отечественных научных школ в становлении и развитии механизации и электрификации сельского хозяйства России (1920-2023 гг.) // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2024. №1. С. 3-10. DOI: 10.31857/S2500262724010019.
5. Ерохин М.Н., Ценч Ю.С., Скороходов Д.М. Вклад академика В.Н. Болтинского в агроинженерную науку и образование (120-летию со дня рождения ученого посвящается) // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. №1. С. 21-29. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-1-21-29.
6. Ценч Ю.С., Сидоров И.В. Академик Д.Н. Прянишников и отечественная школа агрохимиков // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. №1. С. 38-45. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-1-38-45.
7. Мударисов С.Г., Камалетдинов Р.Р. Становление и развитие научной школы профессора А.П. Иофинова // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. №4. С. 103-108. DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-4-103-108.
8. Ценч Ю.С., Годлевская Е.В. Интеграция науки, образования, производства как инструмент решения народнохозяйственных задач в АПК // *Технический сервис машин*. 2023. Т. 61. №4 (153). С. 116-124. DOI: 10.22314/2618-8287-2023-61-4-116-124.
9. Рыжкова Е.В., Фадеева О.М., Широкоград И.И. Становление и развитие высшего аграрного образования в России (XIX – начало XX в.) // *Международный сельскохозяйственный журнал*. 2020. №5(377). С. 66-68. DOI: 10.24411/2587-6740-2020-15096.

10. Зайцева Н.Л., Алдошин Н.В., Рябова Н.Ю. Страницы истории агроинженерного образования России в РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2021. N4. С. 149-169. DOI: 10.26897/0021-342X-2021-4-149-169.
11. Ерохин М.Н. Творец агроинженерной науки. К 150-летию со дня рождения почётного академика В.П. Горячкина // *Вестник Российской академии наук*. 2018. Т. 88. N7. С. 650-658. DOI: 10.31857/S086958730000089-5.
12. Лобачевский Я.П., Ценч Ю.С. Становление системы агроинженерного образования в СССР в 1920-1930-е гг. // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: История России*. 2020. Т. 19. N3. С. 684-698. DOI: 10.22363/2312-8674-2020-19-3-684-698.

REFERENCES

1. Shapka V.V., Bobrov F.A. Scientific school as social institution in the Russian Federation. *World Ecology Journal*. 2015. Vol. 5. N5. 58-71 (In Russian). EDN: UZGDSH.
2. Grezneva O. Scientific schools: principles of classification. *Higher Education in Russia*. 2004. N5. 42-48 (In Russian). EDN: HGOIZN
3. Stukach V.F., Shumakova O.V. Priorities of scientific schools of an agricultural university: demand and potential for development. *Education Management Review*. 2022. Vol. 12. N5. 101-114 (In Russian). DOI: 10.25726/a4962-4537-2787-t.
4. Tsench Yu.S. The role of russian scientific schools in the formation and development of mechanization and electrification for agriculture in Russia (1920-2023 years). *Russian Agricultural Sciences*. 2024. N1. 3-10 (In Russian). DOI: 10.31857/S2500262724010019.
5. Erokhin M.N., Tsench Yu.S., Skorokhodov D.M. Academician V.N. Boltinsky's scientific article legacy in agricultural engineering education and science (commemorating the 120th anniversary of the birth). *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N1. 21-29 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-1-21-29.
6. Tsench Yu.S., Sidorov I.S. Academician D.N. Pryanishnikov and the Russian national research school of agrochemistry. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N1. 38-45 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-1-38-45.
7. Mudarisov S.G., Kamaletdinov R.R. Tracing the evolution and legacy of professor A.P. Iofinov's scientific school. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023. Vol. 17. N4. 103-108 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-4-103-108.
8. Tsench Yu.S., Godlevskaya E.V. Integration of science, education, production as a tool for solving economic problems in the agro-industrial complex. *Machinery Technical Service*. 2023. Vol. 61. N4 (153). 116-124 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2023-61-4-116-124.
9. Ryzhkova E.V., Fadeeva O.M., Shirokorad I.I. Formation and development of higher agricultural education in Russia (XIX – early XX centuries). *International Agricultural Journal*. 2020. N5(377). 66-68 (In Russian). DOI: 10.24411/2587-6740-2020-15096.
10. Zaitseva N.L., Aldoshin N.V., Ryabova N.Yu. Development stages of domestic agroengineering education in Russian State Agrarian University-Moscow Timiryazev Agricultural Academy. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2021. N4. 149-169 (In Russian). DOI: 10.26897/0021-342X-2021-4-149-169.
11. Yerokhin M.N. The creator of agroengineering science. To the 150th anniversary of the birth of honorary academician V.P. Goryachkin. *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2018. Vol. 88. N7. 650-658 (In Russian). DOI: 10.31857/S086958730000089-5.
12. Lobachevsky Ya.P., Tsench Yu.S. The establishment of a system of agricultural engineering education in the USSR in the 1920s and 1930s. *RUDN Journal of Russian History*. 2020. Vol. 19. N3. 684-698 (In Russian). DOI: 10.22363/2312-8674-2020-19-3-684-698.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Мударисов С.Г. – научное руководство, методология, поиск и анализ литературы, обсуждение и анализ полученных результатов, подготовка текста статьи, формирование общих выводов;

Неговора А.В. – концептуализация, обсуждение и анализ полученных результатов, подготовка текста статьи;

Фаяуршин А.Ф. – обсуждение и анализ полученных результатов, подготовка текста статьи.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Mudarisov S.G. – scientific supervision, methodology development, literature review and analysis, analysis and interpretation of the results, manuscript preparation, formulation of overall conclusions;

Negovora A.V. – conceptualization; analysis and interpretation of the results;

Fayurshin A.F. – analysis and interpretation of the results.

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

01.12.2025

25.02.2026