



ISSN 2687-1149 (Print)
ISSN 2687-1130 (Online)

АГРОИНЖЕНЕРИЯ

Научный журнал

Том 27. № 1 / 2025

Учредитель и издатель:
ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА
имени К.А. Тимирязева

Адрес учредителя и издателя:
127434, Российская Федерация,
г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49

Свидетельство о регистрации
средства массовой информации
ПИ № ФС77-78053
от 06 марта 2020 г.

Основан в 2003 году

Периодичность: 6 номеров в год

Журнал «Вестник
федерального государственного
образовательного учреждения
высшего профессионального образования
«Московский государственный
агроинженерный университет
имени В.П. Горячкина» переименован
и зарегистрирован с новым названием
«Агроинженерия» 6 марта 2020 г.

Полнотекстовые версии доступны на сайте
https://www.elibrary.ru/title_profile.asp?id=8505

Редактор – И.В. Мельникова
Литературная обработка текста –
В.И. Марковская
Компьютерный набор и верстка –
А.С. Лаврова
Перевод на английский язык –
А.Ю. Алипичев

Адрес редакции: 127434, Москва,
Тимирязевская ул., 58, к. 336
Тел.: +7 (499) 976-07-27
Е-mail: agroeng@rgau-msha.ru
<https://agroengineering.timacad.ru/jour/index>

Отпечатано в типографии
ООО «ЭйПиСиПаблшинг»
127550, г. Москва,
Дмитровское ш., д. 45, корп. 1, оф. 8
Тел.: +7 (499) 976-51-84, (985) 109-44-19

Подписано в печать 31.01.2025
Формат 60 84/8
Тираж 500 экз.

© ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА
имени К.А. Тимирязева, 2025

Главный научный редактор

Михаил Никитичевич Ерохин, академик РАН, д-р техн. наук, профессор кафедры сопротивления материалов и деталей машин, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Россия), <https://orcid.org/0000-0001-6573-0950>, n.erohin@rgau-msha.ru

Заместитель главного научного редактора:

Алексей Семенович Дорохов, академик РАН, д-р техн. наук, профессор, заместитель директора по научно-организационной работе, ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (г. Москва, Россия), <https://orcid.org/0000-0002-4758-3843>, dorokhov.vim@yandex.ru

Олег Альбертович Леонов, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой метрологии, стандартизации и управления качеством, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Россия), <https://orcid.org/0000-0001-8469-8052>, oaleonov@rgau-msha.ru

Петр Федорович Кубрушко, чл.-корр. РАО, д-р пед. наук, профессор, заведующий кафедрой педагогики и психологии профессионального образования РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Россия), <https://orcid.org/0000-0002-2142-1037>, kubrushko@rgau-msha.ru

Члены редакционного совета:

Николай Васильевич Алдошин, д-р техн. наук, профессор, ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (г. Москва, Россия), <https://orcid.org/0000-0002-0446-1096>, aldoshin@rgau-msha.ru

Алексей Юрьевич Алипичев, канд. пед. наук, доцент кафедры иностранных и русского языков РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Россия), <https://orcid.org/0000-0002-8000-4532>, alipichev@rgau-msha.ru

Алексей Сергеевич Апатенко, д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой технического сервиса машин и оборудования, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Россия), <https://orcid.org/0000-0002-2492-9274>, a.apatenko@rgau-msha.ru

Виктор Иванович Балабанов, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой мелиоративные и строительные машины, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Россия), <https://orcid.org/0000-0001-6486-6485>, vbalabanov@rgau-msha.ru

Сергей Михайлович Гайдар, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой материаловедения и технологии машиностроения, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Россия), <https://orcid.org/0000-0003-4290-2961>, techmash@rgau-msha.ru

Сергей Николаевич Девянин, д-р техн. наук, профессор кафедры тракторов и автомобилей, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Россия), <https://orcid.org/0000-0001-6776-0432>, s.devyanin@rgau-msha.ru

Владимир Ильич Засинайлов, д-р техн. наук, профессор кафедры электроснабжения и электротехники имени академика И.А. Будзко, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Россия), <https://orcid.org/0000-0002-2623-760X>, vzaginajlov@rgau-msha.ru

Иван Юрьевич Игнаткин, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры сопротивления материалов и деталей машин, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Россия), <https://orcid.org/0000-0003-4867-1973>, ignatkin@rgau-msha.ru

Сергей Павлович Казанцев, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой сопротивления материалов и деталей машин, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Россия), kazansev@rgau-msha.ru

Тамара Петровна Кобозева, д-р. с.-х. наук, профессор ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (г. Москва, Россия), tkobozeva@rgau-msha.ru

Алексей Иванович Купреенко, д-р техн. наук, профессор кафедры технологического оборудования животноводства и перерабатывающих производств, Брянский государственный аграрный университет (с. Кокино Брянская обл., Россия), <https://orcid.org/0000-0002-3781-9592>, kupreenkoai@mail.ru

Александр Григорьевич Левшин, д-р техн. наук, профессор кафедры эксплуатации машинно-тракторного парка, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Россия), <https://orcid.org/0000-0001-8010-4448>, alevshin@rgau-msha.ru

Людмила Ивановна Назарова, канд. пед. наук, доцент кафедры педагогики и психологии профессионального образования, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Россия), <https://orcid.org/0000-0001-5698-6284>, nazarova@rgau-msha.ru

Александр Геннадиевич Пастухов, д-р техн. наук, профессор кафедры технической механики и конструирования машин, Белгородский государственный аграрный университет им. В.Я. Горина (п. Майский, Белгородская обл., Россия), <https://orcid.org/0000-0001-8249-8970>, pastukhov_ag@mail.ru

Ирена Вениаминовна Роберт, академик РАО, д-р пед. наук, профессор, главный научный сотрудник ФГБНУ «Институт стратегии развития образования РАО» (г. Москва, Россия), <https://orcid.org/0000-0001-9303-6560>, rena_robert@mail.ru

Владимир Федорович Сторчевой, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Теоретическая электротехника», Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (г. Москва, Россия), <https://orcid.org/0000-0002-6929-3919>, v.storchevoy@rgau-msha.ru

Юрий Хасанович Шогенов, д-р техн. наук, старший научный сотрудник, зав. сектором механизации, электрификации и автоматизации ОСХН РАН, ФГБУ «Российская академия наук» (г. Москва, Россия), <https://orcid.org/0000-0002-7588-0458>, yh1961s@yandex.ru

Игорь Викторович Юдаев, д-р техн. наук, профессор кафедры применения электроэнергии, Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина (г. Краснодар, Россия), <https://orcid.org/0000-0002-3435-4873>, etsh1965@mail.ru

Иностранные члены редакционного совета:

Айтжан Мухамеджанович Абдыров, д-р пед. наук, профессор Казахского агротехнического университета им. С. Сейфуллина (г. Нур-Султан, Казахстан), <https://orcid.org/0000-0002-6852-0235>, abdyrov@rambler.ru

Павел Викторович Авраменко, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой стандартизации, метрологии и инженерной графики Белорусского аграрного технического университета (г. Минск, Белоруссия), <https://orcid.org/0000-0002-8420-3977>, pavel.auramenka@bsatu.by

Снежан Иванов Божков, канд. техн. наук, проф., Институт почвоведения, агротехнологий и защиты растений им. Н. Пушкарова, Сельскохозяйственная академия (г. София, Болгария), <https://orcid.org/0000-0002-5702-4893>, bozhkov@mail.bg

Фармон Муртозевич Маматов, д-р техн. наук, профессор кафедры механизации сельского хозяйства и сервиса, Каршинский инженерно-экономический институт (г. Карши, Республика Узбекистан), <https://orcid.org/0000-0002-8916-4225>, fmamatov_50@mail.ru

Франтишек Кумхала, профессор, председатель отделения сельскохозяйственного машиностроения и строительства Чешской академии сельскохозяйственных наук, член бюро Чешской академии сельскохозяйственных наук, заведующий кафедрой сельскохозяйственных машин Университета естественных наук (Прага, Чешская Республика), <https://orcid.org/0000-0002-7782-6033>, kumhala@tf-czu.cz

Хоанг Дык Куанг, канд. хим. наук, Российско-Вьетнамский Тропический научно-исследовательский и технологический центр (г. Хошимин, Вьетнам), <https://orcid.org/0000-0002-6487-8782>, quanghoang1510@gmail.com



Founder and Publisher:

**Russian State Agrarian University –
Moscow Timiryazev Agricultural Academy**

Address of Founder and Publisher:

49, Timiryazevskaya str., Moscow,
127434, Russian Federation

The mass media registration certificate
ПИ No. ФС 77-78053 of March 6, 2020

Founded in 2003

Publication Frequency:

Bimonthly

Scientific Journal "Vestnik of Federal State
Educational Institution of Higher Professional
Education "Moscow State Agroengineering
University named after V.P. Goryachkin"
[Vestnik FGOU VPO "Moskovskiy
gosudarstvennyy agroinzhenernyy universitet
imeni V.P. Goryachkina"] was renamed
and registered under a new title
on March 6, 2020.

Full versions are posted on the site
https://www.elibrary.ru/title_profile.asp?id=8505

EXECUTIVE EDITORS:

I.V. Melnikova
V.I. Markovskaya
A.S. Lavrova
A. Yu. Alipichev

Editors' office address:

58, Timiryazevskaya str., Moscow,
127434, Russian Federation
Tel.: +7 (499) 976-07-27;
E-mail: agroeng@rgau-msha.ru
<https://agroengineering.timacad.ru/jour/index>

Printed by APC Publishing LLC
office 8, 1, 45, Dmitrovskoe Ave.,
Moscow, 127550, Russia
Tel.: +7 (499) 976-51-84, (985) 109-44-19

Passed for printing 31.01.2025

Format – 60 84/8

Circulation – 500 copies.

© Federal State Budgetary Establishment
of Higher Education – Russian State
Agrarian University – Moscow Timiryazev
Agricultural Academy, 2025

Science Editor-in-Chief

Mikhail N. Erokhin, Full Member of the Russian Academy of Sciences, DSc (Eng), Professor of the Department of Resistance of Materials and Machine Parts, Russian Timiryazev State Agrarian University, (Moscow, Russia), <https://orcid.org/0000-0001-6573-0950>, n.erohin@rgau-msha.ru

Deputy Science Editor-In-Chief:

Aleksei S. Dorokhov, Full Member of the Russian Academy of Sciences, DSc (Eng), Professor, Director Deputy for Science and Organizational Work, Federal State Budgetary Research Institution – Federal Scientific Agroengineering Center (VIM) (Moscow, Russia), <https://orcid.org/0000-0002-4758-3843>, dorokhov.vim@yandex.ru

Oleg A. Leonov, DSc (Eng), Professor, Head of the Metrology, Standardization and Quality Management Department, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, Russia), <https://orcid.org/0000-0001-8469-8052>, oaleonov@rgau-msha.ru

Petr F. Kubrushko, Corresponding Member of the Russian Academy of Education, DSc (Ed), Deputy Scientific Editor-in-Chief, Head of the Department of Pedagogy and Psychology of Professional Education, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, Russia), <https://orcid.org/0000-0002-2142-1037>, kubrushko@rgau-msha.ru

Members of the Editorial Board:

Nikolay V. Aldoshin, DSc (Eng), Professor, Federal State Budgetary Research Institution – Federal Scientific Agroengineering Center (VIM) (Moscow, Moscow, Russia), <https://orcid.org/0000-0002-0446-1096>, aldoshin@rgau-msha.ru

Aleksei Yu. Alipichev, PhD (Ed), Associate Professor, Department of Foreign and Russian Languages, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, Russia), <https://orcid.org/0000-0002-8000-4532>, alipichev@rgau-msha.ru

Aleksei S. Apatenko, DSc (Eng), Associate Professor, Head of the Department of Technical Service of Machinery and Equipment, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, Russia), <https://orcid.org/0000-0002-2492-9274>, a.apatenko@rgau-msha.ru

Viktor I. Balabanov, DSc (Eng), Professor, Head, Department of Irrigation and Construction Machinery, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, Russia), <https://orcid.org/0000-0001-6486-6485>, vbalabanov@rgau-msha.ru

Sergei M. Gaidar, DSc (Eng), Professor, Head of the Department of Materials Science and Engineering Technology, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, Russia), <https://orcid.org/0000-0003-4290-2961>, techmash@rgau-msha.ru

Sergey N. Devyanin, DSc (Eng), Professor, Professor of the Department of Tractors and Automobiles, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, Russia), <https://orcid.org/0000-0001-6776-0432>, s.devyanin@rgau-msha.ru

Vladimir I. Zaginailov, DSc (Eng), Professor, Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering named after Academician I.A. Budzko, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, Russia), <https://orcid.org/0000-0002-2623-760X>, vzaginailov@rgau-msha.ru

Ivan Yu. Ignatkin, DSc (Eng), Associate Professor, Professor, Department of Strength of Materials and Machine Parts, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, Russia), <https://orcid.org/0000-0003-4867-1973>, ignatkin@rgau-msha.ru

Sergey P. Kazantsev, DSc (Eng), Professor, Head of the Department of Strength of Materials and Machine Parts, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, Russia), kazansev@rgau-msha.ru

Tamara P. Kobozeva, DSc (Ag), Professor, Federal State Budgetary Research Institution – Federal Scientific Agroengineering Center (VIM) (Moscow, Russia), tkobozeva@rgau-msha.ru

Aleksei I. Kupreenko, DSc (Eng), Professor, Department of Technological Equipment of Animal Husbandry and Processing Industries, Bryansk State Agrarian University (Kokino, Bryansk region, Russia), <https://orcid.org/0000-0002-3781-9592>, kupreenkoai@mail.ru

Aleksandr G. Levshin, DSc (Eng), Professor, Head of the Department of Machinery and Tractor Operation and High Technologies in Plant Cultivation, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, Russia), <https://orcid.org/0000-0001-8010-4448>, alevshin@rgau-msha.ru

Liudmila I. Nazarova, PhD (Ed), Associate professor, Department of Pedagogy and Psychology of Professional Education, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, Russia), <https://orcid.org/0000-0001-5698-6284>, nazarova@rgau-msha.ru

Aleksandr G. Pastukhov, DSc (Eng), Professor, Department of Technical Mechanics and Machine Design, Belgorod State Agrarian University named after V.Y. Gorin, Russia. (Mayskiy, Belgorod region, Russia), <https://orcid.org/0000-0001-8249-8970>, pastukhov_ag@mail.ru

Irena V. Robert, Full Member of the Russian Academy of Education, DSc (Ed), Professor, Chief Research Associate, the Institute for Educational Development Strategy of the Russian Academy of Education (Moscow, Russia), <https://orcid.org/0000-0001-9303-6560>, rena_robert@mail.ru

Vladimir F. Storcheyov, DSc (Eng), Professor, Professor of the Department of Theoretical Electrical Engineering; Moscow Aviation Institute (National Research University) (Moscow, Russia), <https://orcid.org/0000-0002-6929-3919>, v.storcheyov@rgau-msha.ru

Yuriy Kh. Shogenov, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, DSc (Eng), Senior Research Associate, Head of the "Mechanization, Electrification and Automation" Section, Department of Agricultural Sciences, Federal State Budgetary Institution – the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia), <https://orcid.org/0000-0002-7588-0458>, yh1961s@yandex.ru

Igor V. Yudaev, DSc (Eng), Professor, Department of Electricity Application, Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, (Krasnodar, Russia), <https://orcid.org/0000-0002-3435-4873>, etsh1965@mail.ru

International members of the Editorial Board:

Aytzhan M. Abdryov, DSc (Ed), Professor, S. Seifullin Kazakh Agro Technical University, (Nur-Sultan, Kazakhstan), <https://orcid.org/0000-0002-6852-0235>, abdryov@rambler.ru

Pavel V. Avramenko, PhD (Eng), Associate Professor, Head of the Department of Standardization, Metrology and Engineering Graphics, Belarusian Agrarian Technical University (Minsk, Belarus), <https://orcid.org/0000-0002-8420-3977>, pavel.auramenka@bsatu.by

Snezhana I. Bozhkov, PhD (Eng), Professor, Institute of Soil Science, Agrotechnology and Plant Protection named after N. Pushkarov, Agricultural Academy (Sofia, Bulgaria), <https://orcid.org/0000-0002-5702-4893>, bozhkov@mail.bg

Farmon M. Mamatov, DSc (Eng), Professor, Professor of the Agricultural Mechanization and Service Department, Karshi Institute of Engineering and Economics (Karshi, Republic of Uzbekistan), <https://orcid.org/0000-0002-8916-4225>, fmamatov_50@mail.ru

Frantisek Kumhala, Professor, Chairman of the Agricultural Machinery and Construction Division of the Czech Academy of Agricultural Sciences, the Bureau Member of the Czech Academy of Agricultural Sciences, Head of the Department of Agricultural Machines of Czech University of Life Sciences (Prague, Czech Republic), <https://orcid.org/0000-0002-7782-6033>, kumhala@tf-czu.cz

Quang Hoang Duc, PhD (Chem), Russian-Vietnamese Tropical Research and Technology Centre (Ho Chi Minh, Vietnam), <https://orcid.org/0000-0002-6487-8782>, quanghoangl510@gmail.com

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ АПК

А.Ю. Брюханов, В.Д. Попов, В.Ф. Федоренко, Э.В. Васильев, Е.В. Шалавина Индустрия побочных продуктов животноводства и ее научно-техническое обеспечение.....	4
Ю.А. Киров, В.А. Милюткин, В.Ю. Киров, А.А. Рябцев Обоснование конструктивно-технологической схемы насоса-понтон для гомогенизации и перекачки жидких органических удобрений из лагун-навозохранилищ	13
А.А. Жиздюк, В.Н. Буйлов, С.В. Чумакова, М.Н. Ахилбеков Применение цифровых двойников технологических машин в АПК при эксплуатации и сервисном обслуживании	20
С.Д. Шепелёв, И.П. Трояновская, М.В. Пятаев, Е.В. Шалонкина Исследование широкозахватной пружинной бороны с параллелограммной подвеской рабочей секции.....	26
Т.А. Клевцова, А.В. Гвоздев Инновационные решения технического обеспечения процесса производства комбикормов в фермерских хозяйствах	34
В.К. Каличкин, Д.С. Федоров, К.Ю. Максимович, В.С. Риксен Машинное обучение при прогнозировании продуктивности севооборотов	41
И.В. Грибов, А.С. Зенин, А.В. Коломейченко, М.В. Шипов, С.Б. Карякин, Н.В. Перевозчикова Оценка функциональных характеристик тракторов тягового класса 4,0	53

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

Ю.К. Альтудов, З.И. Дударов, А.Х. Занилов, Ю.Х. Шогенов Установка для исследования механизмов трансформации СО ₂ в системе «Почва-растение-атмосфера»	59
М.В. Беляков, Е.А. Никитин, Д.С. Пятченков Экспресс-диагностика комбикорма и его составляющих методом видимой и ближней инфракрасной спектроскопии	68
А.В. Вострухин, М.А. Мастепаненко, И.Н. Воротников, Е.А. Вахтина Алгоритм разработки программного обеспечения беспроводной системы мониторинга температуры сельскохозяйственных объектов	75
Д.В. Белов, Н.Е. Кабдин, С.А. Андреев Совершенствование конструкции микродирижабля сельскохозяйственного назначения	82

ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

В.И. Трухачев, Е.В. Хохлова, Е.Н. Кролевецкая Стратегические ориентиры развития аграрного образования: форсайт-кейс РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева	89
--	----

CONTENTS

FARM MACHINERY AND TECHNOLOGIES

A.Yu. Briukhanov, V.D. Popov, V.F. Fedorenko, E.V. Vasilev, E.V. Shalavina Scientific and technical support of animal by-product industry	4
Yu.A. Kirov, V.A. Milyutkin, V.Yu. Kirov, A.A. Ryabtsev Rationale for the design and workflow diagram of a pontoon pump for homogenization and pumping of liquid organic fertilizers from manure lagoons	13
A.A. Zhizdyuk, V.N. Builov, S.V. Chumakova, M.N. Akhilbekov Application of digital twins of technological farm machines during their operation and maintenance	20
S.D. Shepelev, I.P. Troyanovskaya, M.V. Pyataev, E.V. Shalonkina Study of a wide-level spring harrow with parallelogram suspension of the working section	26
T.A. Klevtsova, A.V. Gvozdev Innovative solutions for the technical support of the feed production process in farms	34
V.K. Kalichkin, D.S. Fedorov, K.Yu. Maksimovich, V.S. Riksen Machine learning in predicting crop rotation productivity.....	41
I.V. Gribov, A.S. Zenin, A.V. Kolomeychenko, M.V. Shipov, S.B. Karyakin, N.V. Perevozchikova Functional evaluation of tractors of traction class 4.0.....	53

POWER SUPPLY AND AUTOMATION OF AGRICULTURAL PRODUCTION

Yu.K. Altudov, Z.I. Dudarov, A.H. Zanirov, Yu.Kh. Shogenov Installation for studying the mechanisms of CO ₂ transformation in the "Soil-Plants-Atmosphere" system	59
M.V. Belyakov, E.A. Nikitin, D.S. Pyatchenkov Diagnostics of compound feeds and their components by visible and near infrared spectroscopy	68
A.V. Vostrukhin, M.A. Mastepanenko, I.N. Vorotnikov, E.A. Vakhtina Algorithm of software development for a wireless system monitoring the temperature of agricultural premises	75
D.V. Belov, N.E. Kabdin, S.A. Andreev Improving the design of micro-airship of an agricultural purpose.....	82

THEORY AND METHODOLOGY OF PROFESSIONAL EDUCATION

V.I. Trukhachev, E.V. Khokhlova, E.N. Krolevetskaya Strategic guidelines for the development of agrarian education: foresight case of Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy.....	89
---	----

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ АПК

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.171

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-4-12>



Индустрия побочных продуктов животноводства и ее научно-техническое обеспечение

А.Ю. Брюханов¹, В.Д. Попов², В.Ф. Федоренко³, Э.В. Васильев⁴, Е.В. Шалавина⁵

^{1,2,4,5} Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал Федерального научного агроинженерного центра ВИМ; г. Санкт-Петербург, Россия

³ Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия

¹ sznii@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4963-3821>

² popov_vd@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8781-0879>

³ fedorenko@rosinformagrotech.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6398-4463>

⁴ sznii6@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5910-5793>

⁵ shalavinaev@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7345-1510>

Аннотация. Побочные продукты животноводства (ППЖ), образующиеся при производстве основной сельскохозяйственной продукции, должны вовлекаться в замкнутый цикл функционирования агроэкосистем для воспроизводства плодородия земель сельскохозяйственного назначения. С целью формирования комплексного подхода к проблеме утилизации и подготовки навоза к использованию в виде ППЖ проведен анализ актуальной проблемы переработки и использования навоза и помета в качестве органических удобрений в субъектах Российской Федерации. Изучались количественные и качественные характеристики ППЖ, технико-технологическое оснащение регионов, нормативно-правовая база по оценке техногенного воздействия на окружающую среду и организацию экологического мониторинга. Установлено, что объем ежегодно образуемых в сельскохозяйственных организациях ППЖ, доступных для переработки и внесения в качестве удобрения, достигает более 250 млн т. В 2022 г., например, внесение органических удобрений составило лишь 70,3 млн т, что объясняется недостаточной технико-технологической оснащенностью сельскохозяйственных организаций и неразвитостью индустрии побочных продуктов животноводства. По нашему мнению, современная индустрия побочных продуктов животноводства должна применять наилучшие доступные технологии переработки навоза и высокотехнологичные инженерные системы, цифровой мониторинг производства ППЖ, актуальные экостандарты для экологически безопасных технологий и технических средств, интеллектуальные цифровые инструменты производственного экологического контроля, принимать адаптивные меры по экономической поддержке агроэкологических мероприятий. Предлагаемые нами меры дадут отечественному сельскохозяйственному производству не менее 350 млн т качественных органических удобрений и сокращение отрицательного баланса в питательных элементах не менее чем на 2000 тыс. т NPK.

Ключевые слова: индустрия побочных продуктов животноводства, побочные продукты животноводства, внесение органических удобрений, технологии переработки навоза, экостандарт, цифровой мониторинг

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках Государственных заданий: ФГБНУ ФНАЦ ВИМ No FGUN-2022-0010

Для цитирования: Брюханов А.Ю., Попов В.Д., Федоренко В.Ф., Васильев Э.В., Шалавина Е.В. Индустрия побочных продуктов животноводства и ее научно-техническое обеспечение // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 1. С. 4-12. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-4-12>

ORIGINAL ARTICLE

Scientific and technical support of animal by-product industry

A.Yu. Briukhanov¹, V.D. Popov², V.F. Fedorenko³, E.V. Vasilev⁴, E.V. Shalavina⁵✉^{1,2,4,5} Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) –

Branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Saint Petersburg

³ Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia¹ sznii@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4963-3821>² popov_vd@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8781-0879>³ fedorenko@rosinformagrotech.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6398-4463>⁴ sznii6@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5910-5793>⁵ shalavinaev@mail.ru✉; <https://orcid.org/0000-0002-7345-1510>

Abstract. Animal by-products are additional outputs of the main farm production. They should be integrated into the closed cycle of agro-ecosystems to restore the fertility of farm land. The aim of the study was to develop a comprehensive approach to the use and pre-application treatment of manure in the form of animal by-products. The study analyzed the current challenges in the processing and application of animal/poultry manure as organic fertilizer in different regions of the Russian Federation. The authors analyzed the quantity and quality of animal by-products, technologies and equipment available in the regions, laws and regulations relating to the assessment of the man-made environmental impact, and the state of environmental monitoring. The study found that the annual volume of animal by-products formed in agricultural organizations and available for processing and fertilizing application was above 250 million tons. While the use of organic fertilizers in 2022, for example, amounted to only 70.3 million tons. This could be due to the lack of equipment and technologies in agricultural organizations, and the underdevelopment of the animal by-product industry. The authors believe that the considered industry should apply the best available manure processing technologies, high-tech engineering systems, digital monitoring of production processes, and intelligent digital tools for on-farm environmental control. This list may also include adaptive measures of economic support for agro-ecological activities and relevant eco-standards for environmentally safe technologies, machines and equipment. The above proposals will add at least 350 million tons of high-quality organic fertilizers to domestic agricultural production and reduce the negative balance of nutrients by at least 2000 thousand tons of NPK.

Keywords: animal by-product industry, animal by-products, organic fertilizer application, manure processing technologies, environmental standard, digital monitoring

Funding: The research was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation under State Assignment for Federal Scientific Agroengineering Center VIM No. FGUN-2022-0010.

For citation: Briukhanov A.Yu., Popov V.D., Fedorenko V.F., Vasilev E.V., Shalavina E.V. Scientific and technical support of animal by-product industry. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(1):4-12 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-4-12>

Введение

Наряду с производством основной сельскохозяйственной продукции образуются побочные продукты животноводства (ППЖ), которые целесообразно вовлекать в замкнутый цикл функционирования агроэкосистем [1, 2]. Понятие «побочные продукты животноводства» как средство воспроизводства плодородия земель сельскохозяйственного назначения определено Федеральным законом № 248-ФЗ¹, вступившем в силу 1 марта 2023 г. Предприятиям предлагается выбор из трех направлений организации

работы с навозом и пометом: первое (основное) направление – в соответствии с ФЗ № 248 о ППЖ; второе направление, с учетом ФЗ № 109 об агрохимикатах², применяется в случае изготовления из навоза и помета товарной продукции (органоминеральные и органические удобрения), реализуемой через любую торговую сеть (рис. 1). Согласно третьему направлению, регулирующему ФЗ № 89³, предприятия

¹ О побочных продуктах животноводства и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: Федеральный закон от 14 июля 2022 г. № 248-ФЗ. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_421776/ (дата обращения: 01.02.2024).

² О безопасном обращении с пестицидами и агрохимикатами: Федеральный закон от 19 июля 1997 г. № 109-ФЗ, с изм. на 8 августа 2024 г. URL: <https://docs.cntd.ru/document/9045962> (дата обращения: 01.02.2024).

³ Об отходах производства и потребления: Федеральный закон от 24 июня 1998 г. № 89-ФЗ, с изм. на 8 августа 2024 г. URL: <https://docs.cntd.ru/document/901711591> (дата обращения: 01.02.2024).



Рис. 1. Основные направления правового регулирования обращения с навозом и пометом

Fig. 1. Main areas of legal regulation of animal and poultry manure handling

могут передать навоз как отход перерабатывающей лицензированной организации. Каждое направление требует применения определенных технологий и наличия инфраструктуры.

Для эффективного вовлечения ППЖ в сельскохозяйственное производство необходимо создание новой индустрии, направленной на получение новых полезных продуктов, позволяющих повышать плодородие почв, восстанавливать загрязненные земли, обеспечивать прибавку высококачественного урожая, снижать риски негативного воздействия на природу [3, 4].

Цель исследований: анализ научно-технического, организационно-экономического, правового, финансового и нормативно-технологического обеспечения сельскохозяйственного производства побочными продуктами животноводства при утилизации и переработке навоза.

Материалы и методы

Исследования проводились путем комплексного, системного изучения проблемы переработки и использования навоза и помета в качестве органических удобрений в субъектах Российской Федерации. Изучались количественные и качественные

характеристики ППЖ, технико-технологическое оснащение регионов, нормативно-правовая база по оценке техногенного воздействия на окружающую среду и организации экологического мониторинга. При определении базовых технологий использовались подходы к обоснованию наилучших доступных технологий (НДТ) при рассмотрении цифровых методов мониторинга, анализа и организации логистики, учитывался положительный опыт Ленинградской области. При оценке требуемых для создания индустрии инвестиций использовались удельные стоимостные показатели реализации современных проектов по переработке, хранению и использованию ППЖ [5, 6].

Результаты и их обсуждение

По результатам проведенных в 2023 г. исследований (на основании статистических данных за декабрь 2022 г.), во всех категориях хозяйств КРС, свиноводства и птицеводства в окружающую среду выделяется 435 млн т навоза и помета (с учетом навоза, оставленного на пастбищах). На переработку должно поступать порядка 418 млн т, в том числе из сельскохозяйственных организаций – порядка 256 млн т.

Распределение образования навоза по федеральным округам Российской Федерации без учета той части навоза, которая остается на сельскохозяйственных угодьях при использовании пастбищной системы содержания КРС, приведено в таблице 1. Количество образованного навоза получено на основе расчетных методов, учитывающих поголовье животных, половозрастные группы, системы содержания животных и технологии навозо-пометоудаления.

Ежегодно в сельскохозяйственных организациях образуется 256,7 млн т навоза КРС, свиней

и птиц (62,4% от всего количества), при этом в 2022 г. внесено только 70,3 млн т органических удобрений. Такая разница может объясняться как качеством предоставляемых отчетных данных, так и реальными обстоятельствами, связанными с недостаточной технико-технологической оснащенностью сельскохозяйственных организаций. Так, по укрупненной оценке, потребность в дополнительных технических средствах для транспортировки и внесения ППЖ составляет не менее 16000 ед. (табл. 2) [2].

Таблица 1

**Образование навоза и помета по федеральным округам Российской Федерации
и внесение органических удобрений, млн т в год**

Table 1

**Animal and poultry manure output by Federal Districts of the Russian Federation
and application of organic fertilizers, million tons per year**

Регион <i>Region</i>	КРС <i>Cattle</i>	КРС* <i>Cattle*</i>	Свины <i>Pigs</i>	Свины* <i>Pigs*</i>	Птица <i>Poultry</i>	Птица* <i>Poultry*</i>	Всего навоза и помета <i>Total animal/poultry manure</i>	Внесение органических удобрений <i>Application of organic fertilizers</i>
Российская Федерация / Russian Federation	289,4	138,9	103,1	96,2	26,3	21,6	418,8	70,3
Центральный федеральный округ <i>Central Federal District</i>	52,3	44,0	55,5	54,8	7,8	7,31	115,6	29,2
Северо-Западный федеральный округ <i>North-Western Federal District</i>	12,6	10,6	6,9	6,8	2,1	2,08	21,6	5,2
Южный федеральный округ <i>Southern Federal District</i>	37,1	9,4	5,5	4,7	3,2	1,69	45,8	4,9
Северо-Кавказский федеральный округ <i>North Caucasian Federal District</i>	32,0	4,6	1,4	1,0	1,6	0,97	35,0	5,6
Приволжский федеральный округ <i>Volga Federal District</i>	74,0	39,1	15,7	14,1	6,1	4,84	95,8	16,5
Уральский федеральный округ <i>Ural Federal District</i>	17,5	9,4	6,7	5,9	2,5	2,36	26,8	2,9
Сибирский федеральный округ <i>Siberian Federal District</i>	44,7	19,0	8,7	6,6	2,5	1,99	55,9	5,7
Дальневосточный федеральный округ <i>Far Eastern Federal District</i>	19,1	2,8	2,7	2,4	0,5	0,36	22,3	0,3

*В сельскохозяйственных организациях / *In agricultural organizations.*

Таблица 2

Оснащенность техникой для транспортировки и внесения побочных продуктов животноводства

Table 2

Availability of machines and equipment for animal by-product transportation and application

Вид ППЖ <i>Type of animal by-product</i>	Фактическая оснащенность, тыс. шт. <i>Actual availability, thousand pieces</i>	Требуемая оснащенность, тыс. шт. <i>Required availability, thousand pieces</i>
Твердые / Solid	7,5	14,9
Жидкие / Liquid	7,2	15,8

Недостаточная оснащенность приводит к большим потерям ценного ресурса и загрязнению окружающей среды [7]. В пересчете на питательные вещества только по азоту потери могут составлять более 1 млн т д.в. в год.

Необходимо провести дооснащение и капитальный ремонт площадок/хранилищ. Требования по наличию такой инфраструктуры существуют уже несколько десятков лет. Однако исследования, проведенные более чем в 20 субъектах РФ (Республика Карелия, Ленинградская, Псковская, Калининградская, Тверская, Новгородская, Нижегородская, Ульяновская, Новосибирская, Тюменская, Томская области, Республика Татарстан и др.), показывают, что до 50% предприятий нуждаются в модернизации инфраструктуры по переработке и использованию ППЖ.

Создание индустрии побочных продуктов животноводства требует решения ряда важных задач [2]:

- внедрения высокотехнологичных инженерных систем и наилучших доступных технологий (НДТ) подготовки и использования ППЖ;
- применения цифровых программных средств мониторинга и управления ППЖ;
- разработки адаптивных мер экономической поддержки агроэкологических мероприятий, включающих в себя внедрение экологически безопасных технологий и технических средств по переработке и применению ППЖ;
- создание экостандартов для технологий и технических средств по переработке побочных продуктов и их использованию в качестве органических удобрений;
- внедрения интеллектуальных цифровых инструментов производственного экологического контроля;

Использование средств цифровизации обеспечит автоматизированный мониторинг, анализ информации и подготовку предложений для организации логистики использования органических удобрений. Разработанная в ИАЭП – филиале ФГБНУ ФНАЦ ВИМ – интерактивная программа мониторинга образования побочных продуктов и их использования позволяет обосновать состав и характеристики необходимой инфраструктуры и технических средств на уровне предприятия и области в целом [8-10].

Базовые наилучшие доступные технологии переработки навоза, помета свиноводства и птицеводства и использования побочных продуктов животноводства представлены в актуализированных информационно-технических справочниках НДТ (ИТС НДТ 41, ИТС НДТ 42), которые приняты Приказами Росстандарта от 14 декабря 2023 г. № 2708 и № 2709 и вступили в действие 1 января 2024 г. Для КРС

базовые технологии переработки навоза представлены в РД-АПК 1.10.15-02-17⁴.

Российские производители ООО «БИОКОМПЛЕКС», ООО «Завод специального машиностроения Искандар», АО «ПК «Ярославич», ООО «МЗПО» способны оснастить предприятия всем необходимым оборудованием по переработке ППЖ, транспортировке и внесению органических удобрений (рис. 2).

Примером внедрения технологических проектов в сельхозпредприятия является демонстрационно-исследовательский и образовательный экологический центр, созданный в 2022 г. в Ленинградской области на базе АО «ПЗ «Первомайский»» (2500 гол. КРС) для проведения обучающих семинаров и исследований по переработке побочной продукции животноводства⁵ [11]. Другой пример – проект, разработанный ООО «АИК» и нацеленный на получение высокоэффективных удобрений из куриного помета с использованием промышленных комплексов ускоренного закрытого компостирования⁶.

Внедрение высокотехнологичных инженерных систем и НДТ подготовки и использования ППЖ требует больших затрат. Исследования, проведенные в Ленинградской области, объем навоза и помета в которой составляет 1% от общероссийского, показывают, что инвестиции на модернизацию животноводческих и птицеводческих предприятий могут составить от 21 000 до 23 000 млн руб., необходимость в эксплуатационных затратах – от 2400 до 5 250 млн руб. в год [2] (табл. 3).

Оценка затрат (табл. 3) проведена с учетом 4,8 млн т навоза и помета, которые образуются ежегодно в 134 сельскохозяйственных организациях с общим поголовьем, включающим в себя 161 тыс. гол. КРС, 185 тыс. гол. свиней, 28 млн гол. птицы.

При оценке сценария 2 учитывали, что будут внедрены технологии разделения навоза на фракции для более эффективной переработки и последующего использования; внедрены ферментационные

⁴ Федоренко В.Ф. и др. Методические рекомендации по технологическому проектированию систем удаления и подготовки к использованию навоза и помета РД-АПК 1.10.15.02-17. М.: Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса, 2020. С. 180. EDN: YRIVYF.

⁵ Зеленые проекты. Ситуационные исследования / Под ред. Д.О. Скобелева. М.: Деловой экспресс, 2021. 160 с. EDN: YTEJPH.

⁶ Универсальная технология ускоренного компостирования органического сырья в закрытом помещении с искусственным микроклиматом, принудительной аэрацией и грануляцией (ТУКОС). URL: https://poultryunion.org/f/20230202_tehnologiya_aik.pdf (дата обращения: 02.12.2024).

установки закрытого типа, а также заводы по сушке помета с целью его более эффективного использования; предприятия будут обеспечены навозохранилищами по количеству и вместимости; будет увеличена доля хранилищ закрытого типа; будет достаточное количество технических средств для транспортировки и внесения всего объема органических удобрений с учетом агротехнических сроков.

Основные удельные показатели стоимости отдельных статей затрат на модернизацию приведены в таблице 4.

Учитывая столь значимые затраты на модернизацию (табл. 3), необходимо рассмотреть возможность адаптации существующих мер экономического

стимулирования для освоения наилучших доступных технологий подготовки и использования ППЖ с целью повышения плодородия почв.

Задача разработки проактивных экостандартов для проектирования и внедрения современных технологий и технических средств связана с острой необходимостью актуализации действующей нормативно-технической базы. Большая часть нормативов и стандартов не изменялась в течение более 40 лет. С тех пор используются уже другие породы животных, системы их содержания и кормления и т.д. Применение устаревших норм и стандартов при создании объектов обуславливает существенные технологические ошибки, которые достаточно сложно устранить



Рис. 2. Примеры отечественных технических средств по работе с ППЖ

Fig. 2. Examples of domestic machines and equipment for animal by-product handling

Оценка затрат на модернизацию животноводческой отрасли по переработке и использованию побочных продуктов животноводства (на примере Ленинградской области)

Таблица 3

Cost estimation for upgrading the livestock industry in terms of processing and disposal of animal by-products (as exemplified by the Leningrad Oblast)

Table 3

Показатель <i>Indicator</i>	Сценарий 1* <i>Scenario 1*</i>	Сценарий 2** <i>Scenario 2**</i>
Капитальные затраты, млн руб. / Capital costs, million rubles		
Строительная часть / Construction	11273,6	16339
Техническое оснащение / Machines and equipment	9689,4	6640
Итого / Total	20963	22979
Эксплуатационные затраты, млн руб/год / Operational costs, mil rubles/year		
Влагопоглотители / Moisture absorbers	2106	580
Дизельное топливо / Diesel fuel	515,2	422,1
Заработная плата, ТО и ТР / Salary, maintenance and routine repairs	2630	1412
Итого / Total	5251,2	2414,1

*Сохранение используемых технологий с доведением до соответствия установленным агротехническим и экологическим требованиям / adaptation of the technologies in use to the acting agro-technical and environmental requirements.

**Внедрение наилучших доступных технологий (НДТ) / introduction of the best available technologies (BAT).

Таблица 4

Исходные данные для оценки модернизации

Table 4

Input data for upgrading assessment

Затраты на модернизацию <i>Upgrading costs</i>	Значение* <i>Value*</i>
Средняя стоимость строительства 1 м ³ гидроизолированного хранилища, тыс. руб. <i>Average construction cost of one m³ of a waterproofed storage, thousand rubles</i>	5,0
Средняя стоимость строительства 1 м ² бетонированной площадки, тыс. руб. <i>Average construction cost of one m² of a concreted site, thousand rubles</i>	6,0
Средняя закупочная цена 1 т торфа с доставкой, тыс. руб. <i>Average purchase price of one ton of peat with delivery, thousand rubles</i>	1,5
Агротехнические сроки внесения жидких органических удобрений, дни <i>Agrotechnical time limits of liquid organic fertilizer application, days</i>	120
Средняя закупочная стоимость машины для внесения жидких органических удобрений объемом 16...18 м ³ , тыс. руб. <i>Average purchase price of a machine for liquid organic fertilizer application with the volume of 16 to 18 m³, thousand rubles</i>	10 000
Средняя закупочная стоимость трактора 5-7 тягового класса, тыс. руб. <i>Average purchase price of a tractor of traction class 5-7, thousand rubles</i>	15000
Средняя закупочная стоимость машины для внесения твердых органических удобрений грузоподъемностью 15 т, тыс. руб. <i>Average purchase price of a machine for solid organic fertilizer application with a load-carrying capacity of 15 tons, thousand rubles</i>	6000
Средняя стоимость 1 т дизельного топлива, тыс. руб. / <i>Average cost of one ton of diesel fuel, thousand rubles</i>	48
Средняя стоимость строительства 1 цеха сепарации, тыс. руб. <i>Average construction cost of one separation facility, thousand rubles</i>	25 000
Средняя закупочная стоимость барабанного биоферментатора производительностью 9 т/сут., тыс. руб. <i>Average purchase price of a drum fermenter with a capacity of nine tons per day, thousand rubles</i>	15000
Средняя закупочная стоимость линии термической сушки и грануляции помета производительностью 8 т/ч по готовому продукту, тыс. руб. <i>Average purchase price of a line for thermal drying and granulation of poultry manure with a capacity of eight tons of ready product per hour, thousand rubles</i>	75 000

*Стоимость указана в ценах 2021 г. / *the prices of 2021.*

после ввода объекта в эксплуатацию [2]. При разработке новых экостандартов необходимо обосновать новые удельные значения показателей образования навоза и помета, их физико-химические характеристики, требования к срокам хранения и использования ППЖ. Требования к размерам и объемам площадок и хранилищ для переработки и накопления ППЖ должны учитывать климатическую зону, в которой размещается сельскохозяйственное предприятие, и применяемые агротехнические приемы возделывания сельскохозяйственных культур в регионе.

Внедрение даже самых современных экологически безопасных технологий требует организации и осуществления производственного и экологического контроля [8]. Сегодня в подавляющем большинстве случаев эта задача решается путем принятия локальных стандартов (технологических регламентов и технических условий) на уровне предприятий,

однако качество их исполнения зависит от культуры управления и степени ответственности конкретных руководителей. В ИАЭП – филиале ФГБНУ ФНАЦ ВИМ – разрабатываются интеллектуальные цифровые инструменты производственного экологического контроля, которые могут стать основой для цифровой версии технологического регламента. Особенно это актуально для предприятий, внедряющих «умную» технику и технологии, что позволяет в автоматизированном режиме осуществлять учет образования ППЖ, анализ его характеристик и определение планов внесения органических удобрений под запланированный урожай, определение сроков внесения и требований к машинно-тракторному составу с учетом агротехнических требований и экологических ограничений. По факту выполнения работ в автоматизированном режиме происходит заполнение документации производственного экологического

контроля и формирование таблиц, необходимых для регулярного представления в контролирующие надзорные органы. По мере накопления ежегодной статистики проводится оценка эффективности применения органических удобрений по показателям урожайности и качества сельскохозяйственной продукции, а также показателей плодородия почвы сельскохозяйственных земель, что непосредственно связано с оценкой долгосрочной экологической устойчивости агроэкосистем.

Выводы

1. Индустрия побочных продуктов животноводства должна основываться на наилучших доступных технологиях переработки и использования ППЖ, включать в себя высокотехнологичные инженерные

системы, цифровые программные средства мониторинга и управления ППЖ и интеллектуальные цифровые инструменты производственного экологического контроля; учитывать адаптивные меры экономической поддержки агроэкологических мероприятий и новые экостандарты по переработке ППЖ и их использованию в качестве органических удобрений.

2. Развитая индустрия побочных продуктов животноводства обеспечит отечественное сельскохозяйственное производство высококачественными органическими удобрениями, которые сократят отрицательный баланс питательных элементов не менее чем на 2000 тыс. т NPK, что положительно отразится на производственных показателях и долгосрочной экологической устойчивости агроэкосистем.

Список источников

1. Шалавина Е.В., Васильев Э.В. Повышение экологической безопасности путем разработки технологического регламента переработки и использования побочной продукции животноводства // Агроэкоинженерия. 2023. № 1 (114). С. 141-154. <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2023-1114-141-154>
2. Брюханов А.Ю., Васильев Э.В., Шалавина Е.В. Научно-техническое обеспечение для решения задач Федерального закона № 248 о побочных продуктах животноводства // Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК: Материалы XV Международной научно-практической конференции. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2023. С. 55-61. EDN: FWUCZI
3. Лукин С.М., Золкина Е.И., Марчук Е.В. Влияние длительного применения удобрений на продуктивность севооборота, содержание и качественный состав органического вещества почвы // Плодородие. 2021. № 3 (120). С. 93-98. <https://doi.org/10.25680/S19948603.2021.120.18>
4. Карашаева А.С., Завалин А.А., Ивашенков Г.А., Старостина Е.Н. Влияние удобрений и средств химизации на плодородие почвы и питание растений // Агроэкоинженерия. 2023. № 4 (117). С. 4-14. <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2023-4117-4-14>
5. Кузьмина Т.Н., Свиначев И.Ю., Третьякова О.Л., Скляр А.В. Анализ перечня основного технологического оборудования, эксплуатируемого в случае применения наилучших доступных технологий // Техника и оборудование для села. 2023. № 11 (317). С. 32-35. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2023-11-32-35>
6. Салеева И.П., Кузьмина Т.Н., Малородов В.В. Актуализация информационно-технического справочника по наилучшим доступным технологиям для интенсивного разведения сельскохозяйственной птицы // Птицеводство. 2022. № 10. С. 69-74. <https://doi.org/10.33845/0033-3239-2022-71-10-69-74>
7. Попов В.Д., Федоренко В.Ф., Брюханов А.Ю. Приоритеты экологического развития животноводства России и пути их реализации // Техника и оборудование для села. 2020. № 12 (282). С. 2-5. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2020-12-2-5>
8. Izmailov A.Y., Dorokhov A.S., Briukhanov A.Y., Popov V.D., Shalavina E.V., Okhtilev M.Y., Koromyslichenko V.N. Digital system for monitoring and management of livestock organic waste. In: Hu Z., Gavriushin S., Petoukhov S., He M. (eds) Advances in Intelligent Systems, Computer Science and Digital Economics III. CSDEIS2021. Lecture Notes on Data

References

1. Shalavina E.V., Vasilev E.V. Improving the environmental safety through the development of technological regulations for processing and application of byproducts. *AgroEkoInzheneriya*. 2023;1(114):141-152. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2023-1114-141-154>
2. Briukhanov A.Yu., Vasiliev E.V., Shalavina E.V. Scientific and technical support for solving the tasks of Federal Law No. 248 on animal by-products. In: Scientific and Informational Support for the Innovative Development of the Agribusiness. Proc. XV Int. Sci. Prac. Conf. Moscow, Rosinformagrotekh. 2023:55-61. (In Russ.)
3. Lukin S.M., Zolkina Ye.I., Marchuk Ye.V. Influence of long-term fertilizers application on the crop rotation productivity, content and composition of soil organic matter. *Plodородie*. 2021;3(120):93-98. (In Russ.) <https://doi.org/10.25680/S19948603.2021.120.18>
4. Karashaeva A.S., Zavalin A.A., Ivashenkov G.A., Starostina E.N. Influence of fertilizers and chemical agents on soil fertility and plant nutrition. *AgroEkoInzheneriya* = *AgroEcoEngineering*. 2023;4(117):4-14. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2023-4117-4-14>
5. Kuzmina T.N., Svinarev I.Yu., Tretyakova O.L., Sklyar A.V. Analysis of the list of main technological equipment operated in case of application of the best available technologies. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2023;11(317):32-35. (In Russ.) <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2023-11-32-35>
6. Saleeva I.P., Kuzmina T.N., Malorodov V.V. Actualization of the informational and technical manual on the best available techniques for the intense poultry production. *Ptitsevodstvo*. 2022;71(10):69-74. (In Russ.) <https://doi.org/10.33845/0033-3239-2022-71-10-69-74>
7. Popov V.D., Fedorenko V.F., Briukhanov A.Yu. Priorities for the environmental development of animal husbandry in Russia and ways of their implementation. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2020;12(282):2-5. (In Russ.) <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2020-12-2-5>
8. Izmailov A.Y., Dorokhov A.S., Briukhanov A.Y., Popov V.D., Shalavina E.V., Okhtilev M.Y., Koromyslichenko V.N. Digital system for monitoring and management of livestock organic waste. In: Hu Z., Gavriushin S., Petoukhov S., He M. (eds) Advances in Intelligent Systems, Computer Science and Digital Economics III. CSDEIS2021. Lecture Notes on Data Engineering and Communications

Engineering and Communications Technologies. Springer, Cham. 2022;121:22-33. https://doi.org/10.1007/978-3-030-97057-4_3

9. Плаксин И.Е., Трифанов А.В. Анализ систем интеллектуального управления в сельском хозяйстве // Агроэкоинженерия. 2021. № 4 (109). С. 82-94. <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2021-4109-82-94>

10. 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. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10>

11. Брюханов А.Ю., Попов В.Д., Васильев Э.В. Методы решения экологических проблем в сельскохозяйственном производстве // Известия Международной академии аграрного образования. 2023. № 65. С. 167-171. EDN: ZERKWI

Информация об авторах

¹ Брюханов Александр Юрьевич, д-р техн. наук, доцент, чл.-корр. РАН, главный научный сотрудник; SPIN-код: 8932-5083, AuthorID: 622502; sznii@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4963-3821>

² Попов Владимир Дмитриевич, д-р техн. наук, профессор, академик РАН, главный научный сотрудник, SPIN-код: 3875-5019, AuthorID: 684252; popov_vd@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8781-0879>

³ Федоренко Вячеслав Филиппович, д-р техн. наук, профессор, академик РАН, главный научный сотрудник, SPIN-код: 5363-1873, AuthorID: 672972; fedorenko@rosinformagrotech.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6398-4463>

⁴ Васильев Эдуард Вадимович, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, SPIN-код: 9810-9439, AuthorID: 679939; sznii6@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5910-5793>

⁵ Шалавина Екатерина Викторовна, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, SPIN-код: 4075-6888, AuthorID: 678720; shalavinaev@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7345-1510>

^{1,2,4,5} Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал Федерального научного агроинженерного центра ВИМ; 196634, Санкт-Петербург, пос. Тярлево, Филътровское ш. 3

³ Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5

Вклад авторов

А.Ю. Брюханов – концептуализация, создание черновика рукописи;

В.Д. Попов – методология, научное руководство;

В.Ф. Федоренко – формулирование основных направлений исследований, информационные ресурсы;

Э.В. Васильев – верификация данных, визуализация;

Е.В. Шалавина – формальный анализ, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 15.02.2024, после рецензирования и доработки 07.10.2024; принята к публикации 06.12.2024

Technologies. Springer, Cham. 2022;121:22-33. (In Eng.) https://doi.org/10.1007/978-3-030-97057-4_3

9. Plaksin I.E., Trifanov A.V. Application of intellectual management systems in agriculture. *AgroEkoInzheneriya*. 2021;4(109):82-94. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2021-4109-82-94>

10. Lobachevskiy Ya.P., Dorokhov A.S. Digital technologies and robotic devices in the agriculture. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2021;15(4):6-11. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10>

11. Bryukhanov A.Yu., Popov V.D., Vasiliev E.V. Methods of solving environmental problems in agricultural production. *Izvestiya Mezhdunarodnoy Akademii Agrarnogo Obrazovaniya*. 2023;65:167-171. (In Russ.)

Author Information

¹ Aleksandr Yu. Briukhanov, DSc (Eng), Assistant Professor, Corresponding Member of Russian Academy of Sciences; chief researcher; sznii@yandex.ru <https://orcid.org/0000-0003-4963-3821>

² Vladimir D. Popov, DSc (Eng), Professor, Full Member of Russian Academy of Sciences, chief researcher; popov_vd@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8781-0879>

³ Viacheslav F. Fedorenko, DSc (Eng), Professor, Full Member of the Russian Academy of Sciences; chief researcher, fedorenko@rosinformagrotech.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6398-4463>

⁴ Eduard V. Vasilev, CSc (Eng); Lead Research Engineer; sznii6@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5910-5793>

⁵ Ekaterina V. Shalavina, CSc (Eng); Senior Research Engineer; shalavinaev@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7345-1510>

^{1,2,4,5} IEEP – Branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Filtrovskoe Road, 3, Tyarlevo, Saint Petersburg, 196625, Russian Federation

³ Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 1st Institutsky Proezd Str., Moscow, 5109428, Russian Federation

Author Contribution

A.Yu. Briukhanov – conceptualization, writing – original draft preparation;

V.D. Popov – methodology, research supervision;

V.F. Fedorenko – conceptualization, information resources;

E.V. Vasilev – data verification, visualization;

E.V. Shalavina – formal analysis, writing – review and editing of the manuscript.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests and are responsible for plagiarism.

Received 15.02.2024; Revised 07.10.2024; Accepted 06.12.2024

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.862.2

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-13-19>

Обоснование конструктивно-технологической схемы насоса-понтон для гомогенизации и перекачки жидких органических удобрений из лагун-навозохранилищ

Ю.А. Киров¹, В.А. Милюткин², В.Ю. Киров³, А.А. Рябцев⁴^{1,2,3,4} Самарский государственный аграрный университет; г. Кинель, Россия¹ kirov.62@mail.ru[✉]; <http://orcid.org/0000-0001-6736-1263>² oiapp@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0001-8948-4862>³ kirov.vsevolod@gmail.com⁴ ryabtsevaa@yandex.ru

Аннотация. Жидкие навозные стоки свинокомплексов после некоторой подготовки могут применяться в качестве удобрений. С целью обоснования конструктивно-технологической схемы насоса-понтон для гомогенизации и перекачки жидких органических удобрений из лагун-навозохранилищ проведен анализ научно-технической и специальной литературы, а также выполнены патентные исследования способов и устройств для гомогенизации и перекачки жидких органических удобрений из лагун-навозохранилищ. Разработанная технологическая схема насоса-понтон представляет собой три основных этапа: измельчение и перемешивание в дисмембраторе, перекачка и транспортирование шнековой частью насоса к нагнетательной камере, подача в напорную магистраль лопастной частью насоса-понтон. По методике многофакторного планирования эксперимента определены параметры, оказывающие наибольшее влияние на процесс перекачки жидких органических удобрений: диаметр кожуха транспортирующего шнека, длина транспортирующего шнека и частота вращения его вала. Обоснована конструктивно-технологическая схема насоса-понтон, в которой рабочий орган – дисмембратор, измельчая и перемешивая грубодисперсную массу (жидкие органические удобрения), повышает эффективность их гомогенизации и перекачки из лагун животноводческих комплексов. Основным рабочим органом насосной части является транспортирующий шнек, представляющий собой вал с навитой на него трехзаходной спиралью. Поисковые опыты проводились в производственных условиях очистных сооружений свинокомплекса «Кировский», рассчитанного на 30 тыс. гол. при бесподстилочном содержании. Проведенные исследования позволили обосновать эффективную конструктивно-технологическую схему насоса-понтон для гомогенизации и перекачки жидких органических удобрений из лагун-навозохранилищ, рассчитать основные параметры его рабочего процесса и построить напорно-расходную характеристику предлагаемой конструкции опытного образца насоса-понтон.

Ключевые слова: насос-понтон, насос-понтон для гомогенизации и перекачки жидких органических удобрений, навозные стоки, жидкие органические удобрения, дисмембратор, лагуна-навозохранилище, утилизация отходов животноводческих комплексов

Для цитирования: Киров Ю.А., Милюткин В.А., Киров В.Ю., Рябцев А.А. Обоснование конструктивно-технологической схемы насоса-понтон для гомогенизации и перекачки жидких органических удобрений из лагун-навозохранилищ // Агроинженерия. 2024. Т. 27. № 1. С. 13-19. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-13-19>

ORIGINAL ARTICLE

Rationale for the design and workflow diagram of a pontoon pump for homogenization and pumping of liquid organic fertilizers from manure lagoons

Yu.A. Kirov¹, V.A. Milyutkin², V.Yu. Kirov³, A.A. Ryabtsev⁴^{1,2,3,4} Samara State Agrarian University; Kinel, Russia¹ kirov.62@mail.ru[✉]; <http://orcid.org/0000-0001-6736-1263>² oiapp@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0001-8948-4862>³ kirov.vsevolod@gmail.com⁴ ryabtsevaa@yandex.ru

Abstract. Liquid manure effluents of pig farms can be used as fertilizers after some treatment. In order to substantiate the design and technological scheme of the pontoon pump for homogenization and pumping of liquid organic fertilizers

from manure lagoons and reservoirs, the authors analyzed scientific, technical and special literature, as well as carried out patent research of relevant methods and devices. The developed technological scheme of a pontoon pump represents three main stages: grinding and mixing in the dismembrator, pumping and transportation by the screw part of the pump to the discharge chamber, feeding into the pressure line by the vane part of the pontoon pump. According to the method of multifactor experiment planning, the parameters having the greatest influence on the pumping of liquid organic fertilizers have been determined: the diameter of the auger conveyer casing, the length of the auger conveyer, and the shaft speed. The paper provides a rationale for a design and workflow diagram of the pontoon pump with a dismembrator. This working element crushes and mixes coarse-dispersed mass (liquid organic fertilizers), and thus increases the efficiency of their homogenization and pumping from the manure lagoons of livestock facilities. The main working element of the pumping part is the auger conveyer, which is a shaft with a three-round spiral coiled on it. Search experiments were carried out in production conditions of treatment facilities of the “Kirovsky” pig farm designed for 30 thousand pigs kept litter-free. The conducted researches determined the effective design and technological scheme of the pontoon pump used for homogenization and pumping of liquid organic fertilizers from manure lagoons. Based on the results, we calculated its main operating parameters and built the pressure-flow characteristic of the proposed design of a pontoon pump prototype.

Keywords: pontoon pump, pontoon pump for homogenization and pumping of liquid organic fertilizers, manure effluent, liquid organic fertilizers, dismembrator, manure lagoon, waste disposal of livestock farms

For citation: Kirov Yu.A., Milyutkin V.A., Kirov V.Yu., Ryabtsev A.A. Rationale for the design and workflow diagram of a pontoon pump for homogenization and pumping of liquid organic fertilizers from manure lagoons. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(1):13-19 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-13-19>

Введение

Утилизация отходов животноводческих комплексов – в частности, свиноводческих, всегда являлась важной проблемой. На свинокомплексах образуются навозные стоки влажностью до 98%, которые в переработанном виде представляют собой ценное органическое удобрение [1-3]. В настоящее время утилизация животноводческих стоков осуществляется устаревшим методом, который заключается в отстаивании в незащищенных от осадков лагунах и дальнейшей перекачке «чистых» стоков на поля [4]. Необходимо разработать эффективную технологию переработки навозных стоков в органические удобрения и технические средства для их гомогенизации и перекачки [5].

Для гомогенизации жидких органических удобрений в лагунах-навозохранилищах используются мешалки и миксеры [6, 7]. Насосное оборудование, как правило, используется отдельно. Анализ конструкций насосов для перемешивания и перекачки жидких навозных стоков типа НЖН-200 и НЦИ-100 показал, что насос НЖН-200 изготавливается в стационарном (на раме или на салазках) и передвижном (на колесах) исполнении, а насос НЦИ-100 эксплуатируется в стационарном положении (вертикальном или наклонном). Данные конструкции имеют существенный недостаток – ограниченную мобильность, то есть технологический процесс может осуществляться лишь в отдельных ограниченных местах навозохранилища, и перемещение насосных установок производится при помощи трактора, что увеличивает трудоемкость всего процесса¹.

¹ ЗАО «БЕЛНАСОСПРОМ». URL: <https://nasosprom.by/services/nasosy/nasosy-dlya-zagryaznennoy-vody> (дата обращения: 31.08.2024).

Патентный анализ устройств позволил выявить наиболее перспективные в использовании конструкции для гомогенизации и перекачки жидких органических удобрений (навозных стоков) из лагун-навозохранилищ [8-12]. Наиболее эффективной является конструкция насоса-понтон, позволяющая осуществлять процесс перемешивания (гомогенизации) и перекачки жидких навозных стоков по всей поверхности навозохранилища за счет понтонной части [12].

Цель исследований: обоснование конструктивно-технологической схемы насоса-понтон для гомогенизации и перекачки жидких органических удобрений из лагун-навозохранилищ.

Материалы и методы

Проведен анализ научно-технической и специальной литературы, а также осуществлен патентный поиск способов и устройств для гомогенизации и перекачки навозных стоков из лагун-навозохранилищ. Поисковые опыты проводились в производственных условиях очистных сооружений свинокомплекса «Кировский» Красноармейского района Самарской области. Свинокомплекс рассчитан на 30 тыс. гол. при бесподстильном содержании и использовании гидросмыва для удаления навоза. Местом проведения испытаний являлась лагуна-навозохранилище, дно которой покрыто геопленкой (рис. 1).

Результаты и их обсуждение

Выгодным отличием разработанной конструкции насосной установки [13] от известных является наличие перемешивающего и измельчающего устройства (дисмембратора), позволяющего подавать более однородную смесь навозных стоков в рабочую зону перекачки.



Рис. 1. Работа стандартного миксера в лагуне-навозохранилище свиноплека «Кировский»

Fig. 1. Operation of a standard mixer in a manure storage lagoon of the “Kirovsky” pig farm

Насос-понтон (рис. 2) [13] для гомогенизации и перекачки жидких органических удобрений содержит понтон 1 с размещенной на нем нагнетательной камерой 2 с патрубком 3, механизм привода 4, соединенный с валом 5, закрепленным в подшипниках 6 и 7, нижний свободный конец которого через шарнир 8 закреплен на неподвижном штифтовом диске 9 дисмембратора 10. Кроме того, на валу 5 размещены: подвижный штифтовый диск 11 дисмембратора 10, транспортирующий шнек 12, размещенный в кожухе 13, и лопасти 14. Нижняя часть кожуха 13 соединена с приемной камерой 15, а верхняя часть кожуха 13 свободно насажена на стабилизатор 16 вертикальной устойчивости.

Работает насос-понтон следующим образом. Рабочая часть насоса крепится на понтоне 1 и погружается в лагуну животноводческого комплекса. Через шарнир неподвижного штифтового диска 9 дисмембратора 10 насос-понтон фиксируется по глубине лагуны. Находящееся в лагуне жидкое органическое

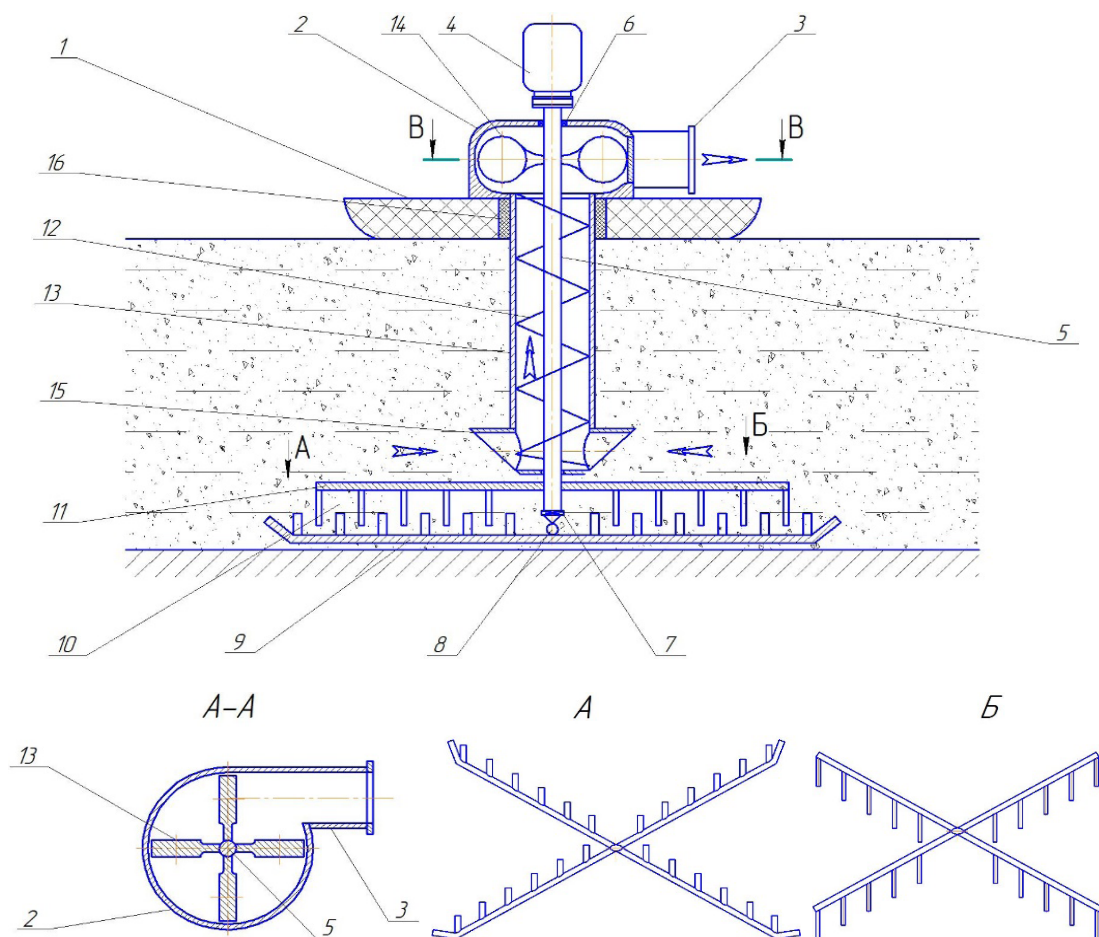


Рис. 2. Насос-понтон для гомогенизации и перекачки жидких органических удобрений:

1 – понтон; 2 – нагнетательная камера; 3 – патрубок; 4 – механизм привода; 5 – вал; 6 и 7 – подшипники; 8 – шарнир; 9 и 11 – неподвижный и подвижный штифтовый диск; 10 – дисмембратор; 12 – транспортирующий шнек; 13 – кожух; 14 – лопасти; 15 – приемная камера; 16 – стабилизатор

Fig. 2. Pontoon pump for homogenization and pumping of liquid organic fertilizers:

1 – pontoon; 2 – discharge chamber; 3 – branch pipe; 4 – drive mechanism; 5 – shaft; 6 and 7 – bearings; 8 – hinge; 9 and 11 – fixed and movable pin discs; 10 – diaphragm; 12 – auger conveyor; 13 – casing; 14 – blades; 15 – receiving chamber; 16 – stabilizer

удобрение сначала гомогенизируется измельчающим и перемешивающим дисмембратором 10, затем усредненная масса жидких органических удобрений засасывается через приемную камеру 15 в зону транспортирующего шнека 12 и по полости, ограниченной кожухом 13, перемещается в нагнетательную камеру 2, где захватывается вращающимися лопатками 14 и под давлением выводится из насоса-понтонна через патрубок 3. Вертикальное положение транспортирующего шнека 12 в кожухе 13 обеспечивается стабилизатором 16 вертикальной устойчивости. Благодаря форме измельчающего и перемешивающего рабочего органа в виде дисмембратора улучшается процесс измельчения и перемешивания грубодисперсной массы органических удобрений, тем самым повышается эффективность их гомогенизации и перекачки из лагун животноводческих комплексов.

Основным рабочим органом шнековых водоподъемников является шнек, представляющий собой вал с навитой на него спиралью. Как правило, шнек выполняют с трехзаходной спиралью, что обеспечивает подачу воды и равнопрочность шнека при любом угле поворота^{2,3}.

Разработанная схема насоса-понтонна для измельчения, перемешивания и перекачки жидких органических удобрений из лагуны-навозохранилища представлена на рисунке 3.

Определяющую роль в разработанной схеме насоса-понтонна играет этап II, который определяет напорную и расходную характеристики всей схемы.

Согласно уравнению Д. Бернулли полный напор (или полная удельная энергия перекачиваемой жидкости) в сечении 1-1 будет равен [14, 15]:

$$H_{1-1} = Z_{1-1} \cdot g + \frac{P_{1-1}}{\rho} + \frac{v_{1-1}^2}{2}, \quad (1)$$

где Z_{1-1} – геодезический напор в сечении 1-1, м; g – ускорение силы тяжести, м/с²; P_{1-1} – давление в сечении 1-1, Па; ρ – плотность жидкости, кг/м³; v – скорость движения жидкости в сечении 1-1, м/с.

² Киров Ю.А., Милюткин В.А., Киров В.Ю. и др. Рациональные технологии и технические средства утилизации побочных продуктов животноводства на органические удобрения: Монография. Кинель: Самарский государственный аграрный университет, 2023. 152 с.

³ Романович А.А. Определение производительности шнекового насоса-дозатора пастообразных кормов // Механизация и электрификация сельского хозяйства: Межведомственный тематический сборник: В 2 т. Т. 2. Минск: Республиканское унитарное предприятие «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по механизации сельского хозяйства», 2014. Вып. 48. С. 134-139.

Полная удельная энергия перекачиваемой жидкости в сечении 2-2:

$$\mathcal{E}_{2-2} = Z_{2-2} \cdot g + \frac{P_{2-2}}{\rho} + \frac{v_{2-2}^2}{2} + h_{w2-2}, \quad (2)$$

где Z_{2-2} – высота центра тяжести сечения 2-2, м; P_{2-2} и v_{2-2} – соответственно абсолютное давление (Па) и скорость потока (м/с) в сечении 2-2.

Следовательно, приращение удельной энергии перекачиваемой жидкости на участке от сечения 1-1 до сечения 2-2, или напор насоса, равен:

$$H = \frac{1}{g} (\mathcal{E}_{2-2} - \mathcal{E}_{1-1}) = (Z_{2-2} - Z_{1-1}) + \frac{P_{2-2} - P_{1-1}}{\rho g} + \frac{v_{2-2}^2 - v_{1-1}^2}{2g} + h_{w2-2}. \quad (3)$$

Потери напора h_{w2-2} от сечения 1-1 до сечения 2-2 вычисляются по формуле Дарси-Вейсбаха и будут равны:

$$h_w = \lambda \frac{l}{D} \cdot \frac{v_{2-2}^2}{2g}, \quad (4)$$

где λ – коэффициент Дарси-Вейсбаха, представляющий собой потери напора по длине (или на трение) участка l , м; l – длина участка от сечения 1-1 до сечения 2-2, м; D – диаметр транспортирующего шнека, м; v_{2-2} – скорость движения воды в сечении 2-2, м/с.

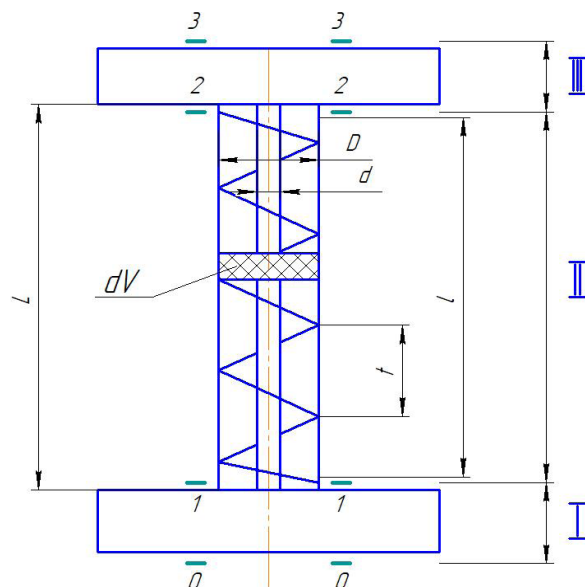


Рис. 3. Схема к расчету насоса-понтонна:

I – процесс измельчения и перемешивания в дисмембраторе;
II – процесс перекачки и транспортировки шнековой частью насоса к нагнетательной камере;
III – подача в напорную магистраль лопастной частью насоса-понтонна

Fig. 3. Structural design of the pontoon pump:

I – process of grinding and mixing in the dismembrator;
II – process of pumping and transportation by the auger conveyor part of the pump to the discharge chamber;
III – into the pressure line by the vane part of the pontoon pump

Потери давления на участке от сечения 1-1 до сечения 2-2:

$$\Delta P = \lambda \frac{l}{D} \cdot \frac{v_{2-2}^2}{2g} \cdot \rho, \quad (5)$$

где ρ – плотность перекачиваемой массы, кг/м³.

Следовательно, напор, создаваемый транспортирующим шнеком, будет определяться как

$$H = (Z_{2-2} - Z_{1-1}) + \frac{P_{2-2} - P_{1-1}}{\rho g} + \frac{v_{2-2}^2 - v_{1-1}^2}{2g} + \lambda \frac{l}{D} \cdot \frac{v_{2-2}^2}{2g}. \quad (6)$$

Исходя из уравнения определения расхода транспортирующего шнека

$$Q = v \cdot S, \quad (7)$$

где S – рабочая площадь поперечного сечения транспортирующего шнека, м²,

$$S = \frac{\pi(D-d)^2}{4}, \quad (8)$$

где D – диаметр шнека, м; d – диаметр вала шнека, м.

Описывая движение жидкости от сечения 1-1 до сечения 2-2, можно записать общее уравнение Д. Бернулли:

$$Z_{1-1} + \frac{P_{1-1}}{\rho g} + \frac{v_{1-1}^2}{2g} = Z_{2-2} + \frac{P_{2-2}}{\rho g} + \frac{v_{2-2}^2}{2g} + \lambda \frac{l}{D} \cdot \frac{v_{2-2}^2}{2g}. \quad (9)$$

Выразив v_{2-2} , получим, что скорость потока на выходе из транспортирующего шнека равна:

$$v_{2-2} = \sqrt{\frac{\left[(Z_{1-1} - Z_{2-2}) + \left(\frac{P_{1-1}}{\rho g} - \frac{P_{2-2}}{\rho g} \right) \right] \cdot 2g}{1 + \lambda \frac{l}{D}}}. \quad (10)$$

Тогда расход Q будет равен:

$$Q = \frac{\pi}{4} (D-d)^2 \sqrt{\frac{\left[(Z_{1-1} - Z_{2-2}) + \left(\frac{P_{1-1}}{\rho g} - \frac{P_{2-2}}{\rho g} \right) \right] \cdot 2g}{1 + \lambda \frac{l}{D}}}. \quad (11)$$

Профиль лопатки шнека выполняется в виде прямой или изогнутой пластины с заостренными входными и выходными кромками. Длина заострения входной и выходной кромок должна составлять 35...50% от диаметра. Толщина лопатки шнека выбирается как можно меньшей для увеличения проходного сечения⁴.

Для обоснования параметров предлагаемой технологической схемы насоса-понтон проведены исследования по методике многофакторного планирования эксперимента⁵. В таблице представлены факторы, влияющие на рассматриваемую характеристику насоса-понтон и уровни их варьирования, которые обосновывались на основании предварительных опытов. При проведении исследований было определено, что наибольшее влияние оказывают следующие факторы: диаметр кожуха транспортирующего шнека D ; длина транспортирующего шнека L ; частота вращения вала транспортирующего шнека n .

Уравнение регрессии примет вид:

$$y = 73,2 - 3,2x_1 - 4,017x_2 - 1,033x_3 + 1,196x_1^2 + 1,196x_2^2 + 5,463x_3^2. \quad (12)$$

Уравнение регрессии в натуральном раскодированном виде:

$$H = 656,94 + 0,000546n^2 - 0,775n + 244,08L^2 - 179,43L + 478,4D^2 - 733,76D. \quad (13)$$

Аналитическая зависимость изменения напора H от диаметра кожуха транспортирующего шнека D и длины транспортирующего шнека L при частоте вращения $n = 700$ об/мин примет вид:

$$H(L; D) = 382,02 + 244,08L^2 - 179,43L + 478,4D^2 - 733,76D. \quad (14)$$

Для обеспечения данной величины напора необходимы следующие геометрические и технологические параметры насоса-понтон: диаметр кожуха транспортирующего шнека $D = 0,21 \dots 0,24$ м; длина транспортирующего

Таблица

Уровни и интервалы варьирования основных факторов при регрессионном анализе

Table

Levels and intervals of variation of the main factors in the regression analysis

Уровни варьирования факторов <i>Levels of variation of factors</i>	Факторы / Factors			Факторы в кодированном виде <i>Factors in a coded form</i>		
	D , м	L , м	N , об/мин	X_1	X_2	X_3
Верхний / Upper	0,75	0,32	800	+1	+1	+1
Основной / Basic	0,70	0,25	700	0	0	0
Нижний / Lower	0,65	0,18	600	-1	-1	-1
Интервал варьирования / Variation interval	0,05	0,07	100	1	1	1

⁴ Швед И.М. Диспергирование навоза в закрытых навозохранилищах миксером с самоочищающимися лопастями: Монография. Минск: БГАТУ, 2020. 140 с.

⁵ Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий: Монография. М.: Наука, 1976. 279 с.

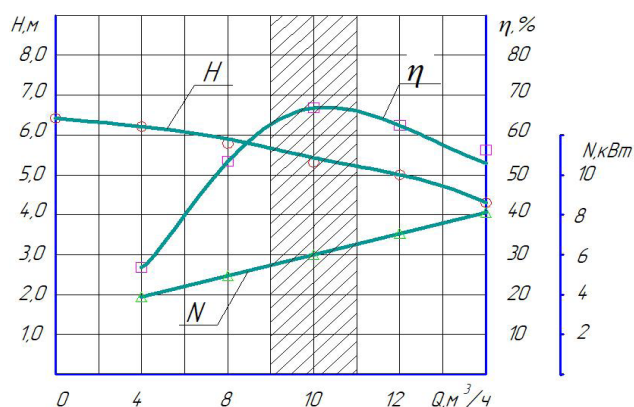


Рис. 4. Напорно-расходная характеристика предлагаемой конструкции опытного образца насоса-понтон

Fig. 4. Pressure and flow characteristics of the proposed design of a prototype pontoon pump

шнека $L = 0,69 \dots 0,74$ м; частота вращения вала транспортирующего шнека $n = 670 \dots 730$ об/мин. Выбранные конструктивные параметры обеспечат эффективное протекание процесса перекачки жидких органических удобрений из лагуны-навозохранилища с заданными значениями напора и расхода.

Список источников

1. Плавающий пропеллерный насос: Авторское свидетельство SU142877 A1, МПК F04D3/00. № 693710 / И.Б. Крепис; заявл. 23.01.1961; опубл. 01.01.1961. EDN: YRRDFE
2. Афанасьев В.Н., Шалавина Е.В. Технологические и технические решения проблемы переработки навоза свиноводческих комплексов // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. 2013. № 4 (12). С. 146-153. EDN: RNIUQZ
3. Катышев Л.Н. Выбор технологий и технических средств для откачки осадка сточных вод и животноводческих стоков из прудов-накопителей с применением средств гидромеханизации // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2006. № S4. С. 395-405. EDN: NENOKZ
4. Киров Ю.А. Разработка технологической линии для разделения навозных стоков // Техника и оборудование для села. 2012. № 4. С. 24-26. EDN: OWZGBB
5. Киров Ю.А., Милюткин В.А., Киров В.Ю. Техническое решение для гомогенизации и перекачки жидких органических удобрений из навозохранилища // Инновационные технологии: опыт, проблемы, перспективы развития, Тверская государственная сельскохозяйственная академия, 25 октября 2023 г. Тверь: Тверская государственная сельскохозяйственная академия, 2023. С. 203-206. EDN: EWRMQY
6. Ковалёв Н.Г., Гриднев П.И., Гриднева Т.Т. Научное обеспечение развития экологически безопасных систем утилизации навоза // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2016. № 1 (50). С. 62-69. EDN: VLMWAN
7. Лычев С.С. Предпроектная подготовка к расчету и проектированию шнековых насосов // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, Белгород, 1-20 мая 2018 г. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2018. С. 2511-2518. EDN: JIESWP
8. Насос-понтон для гомогенизации и перекачки жидких органических удобрений: Патент RU212417 U1, МПК7 A01C 3/00

Результаты проведенных исследований позволили построить общую напорно-расходную характеристику предлагаемой конструкции опытного образца насоса-понтон для гомогенизации и перекачки жидких органических удобрений (рис. 4).

Анализ полученной напорно-расходной характеристики предлагаемой конструкции опытного образца насоса-понтон позволил определить его оптимальные параметры работы при общем расходе $Q = 10$ м³/ч: напор, создаваемый насосом в магистрали $H = 5,2$ м; коэффициент полезного действия $\eta = 0,66$; мощность на привод насоса $N = 6,2$ кВт.

Выводы

Рабочий орган насоса-понтон – дисмембратор – улучшает процесс измельчения и перемешивания грубодисперсной массы органических удобрений, повышая эффективность их гомогенизации и перекачки из лагун животноводческих комплексов.

Предложенная напорно-расходная характеристика предлагаемой конструкции опытного образца насоса-понтон позволяет определить его оптимальные параметры работы.

References

1. Krepis I.B. Copyright certificate No. 142877 A1 USSR, IPC F04D3/00. Floating propeller pump: No. 693710: appl. 23.01.1961: publ. 01.01.1961. (In Russ.)
2. Afanasyev V.N. Shalavina, E.V. Technological and technical solutions problems manure pig farms. *Vestnik Vserossiyskogo Nauchno-Issledovatel'skogo Instituta Mekhanizatsii Zhivotnovodstva*. 2013;4(12):146-153. (In Russ.)
3. Katsyshev L.N. Selection of technologies and technical means for pumping sewage sludge and livestock wastewater from storage ponds using hydromechanization means. *Gorniy Informatsionno-Analiticheskiy Byulleten*. 2006;S4:395-405. (In Russ.)
4. Kirov Yu.A. Technological line for manure drains division into fractions development. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2012;4:24-26. (In Russ.)
5. Kirov Yu.A., Milyutkin V.A., Kirov V.Yu. Technical solution for homogenization and pumping of liquid organic fertilizers from a manure storage facility. *Innovative technologies: Experience, Problems, Development Prospects*, Tver State Agricultural Academy, October 25, 2023. Tver: Tver State Agricultural Academy, 2023. P. 203-206. (In Russ.)
6. Kovalev N.G., Gridnev P.I., Gridneva T.T. Scientific support for the development of environmentally safed systems of manure utilization. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2016;1(50):62-69. (In Russ.)
7. Lychev S.S. Pre-design preparation for the calculation and design of screw pumps. *International scientific and technical conference of young scientists of BSTU named after V.G. Shukhov*, Belgorod, May 01-20, 2018. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2018. P. 2511-2518. (In Russ.)
8. Kirov Yu.A., Kotov D.N., Milyutkin V.A., Kirov V.Yu., Kirov V.A., Kirova Yu.Z., Denisov S.V., Zhiltsov S.N. Pontoon pump for homogenization and pumping of liquid organic fertilizers: Pat. 212417 Russian Federation, МПК7 A01C 3/00; No. 2022111686; 2022. (In Russ.)

/ Ю.А. Киров, Д.Н. Котов, В.А. Милюткин, В.Ю. Киров, В.А. Киров, Ю.З. Кирова, С.В. Денисов, С.Н. Жильцов; № 2022111686; заяв. 28.04.2022; опубл. 21.07.2022, Бюл. № 21. 5 с. EDN: FOQMXF

9. Насос-пonton для гомогенизации и перекачки жидких органических удобрений: Патент RU212418 U1, МПК7 A01C 3/00 / Ю.А. Киров, Д.Н. Котов, В.А. Милюткин, В.Ю. Киров, В.А. Киров, Ю.З. Кирова, С.В. Денисов, С.Н. Жильцов; № 2022112515; заяв. 11.05.2022; опубл. 21.07.2022, Бюл. № 21. 5 с. EDN: ELBDTZ

10. Насос-пonton для гомогенизации и перекачки жидких органических удобрений: Патент RU213980 U1, МПК7 A01C 3/00 / Ю.А. Киров, В.А. Милюткин, Д.Н. Котов, В.Ю. Киров, А.А. Рябцев, В.А. Киров, Ю.З. Кирова, С.В. Денисов; № 2022123625; заяв. 15.09.2022; опубл. 06.10.2022, Бюл. № 28. 5 с. EDN: DTMQNA

11. Насос-пonton для гомогенизации и перекачки жидких органических удобрений: Патент RU214495 U1, МПК7 A01C 3/00 / Ю.А. Киров, В.А. Милюткин, Д.Н. Котов, В.Ю. Киров, А.А. Рябцев, В.А. Киров, Ю.З. Кирова, С.В. Денисов; № 2022123853; заяв. 08.09.2022; опубл. 01.11.2022, Бюл. № 31. 5 с. EDN: OTNRCC

12. Насос-пonton для гомогенизации и перекачки жидких органических удобрений: Патент RU214573 U1, МПК7 A01C 3/00 / Ю.А. Киров, В.А. Милюткин, Д.Н. Котов, В.Ю. Киров, А.А. Рябцев, В.А. Киров, Ю.З. Кирова, С.В. Денисов; № 2022123420; заяв. 01.09.2022; опубл. 03.11.2022, Бюл. № 31. 5 с. EDN: LFBJZR

13. Насос-пonton для гомогенизации и перекачки жидких органических удобрений: Патент RU215666 U1, МПК7 A01C 3/00 / Ю.А. Киров, В.А. Милюткин, Д.Н. Котов, В.Ю. Киров, А.А. Рябцев, В.А. Киров, Ю.З. Кирова, С.В. Денисов; № 2022126341; заяв. 10.10.2022; опубл. 21.12.2022, Бюл. № 36. 5 с. EDN: MACQVG

14. Трифанов А.В., Ворожцов О.В. Обеспечение перемешивания жидкого свиного навоза в пленочном навозохранилище // Молочнохозяйственный вестник. 2017. № 3 (27). С. 125-133. EDN: ZMNSYR

15. Трифанов А.В., Ворожцов О.В. Теоретические предпосылки расчета устройства для перемешивания жидкого свиного навоза в навозохранилищах // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2014. № 85. С. 127-136. EDN: SYDQPN

Информация об авторах

¹ **Киров Юрий Александрович**, д-р техн. наук, доцент; SPIN-код: 2410-5580, AuthorID: 792379; kirov.62@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-6736-1263>

² **Милюткин Владимир Александрович**, д-р техн. наук, профессор; SPIN-код: 3324-2033, AuthorID: 383725; oiapp@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-8948-4862>

³ **Киров Всеволод Юрьевич**, аспирант; kirov.vsevolod@gmail.com

⁴ **Рябцев Андрей Александрович**, аспирант; ryabtsevaa@yandex.ru
^{1,2,3,4} Самарский государственный аграрный университет: 446442, Российская Федерация, Самарская обл., г. Кинель, п. Усть-Кинельский, ул. Учебная, 2

Вклад авторов

Ю.А. Киров – научное руководство, формулирование основной концепции исследования, разработка методологии исследования, формирование выводов исследования; В.А. Милюткин – руководство исследованием, создание окончательной верстки (доработка) рукописи и ее редактирование; В.Ю. Киров – анализ литературных источников, проведение расчетов, подготовка первоначального варианта текста; А.А. Рябцев – проведение экспериментальных исследований, подготовка графических материалов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат.

Статья поступила 04.07.2024, после рецензирования и доработки 04.12.2024; принята к публикации 06.12.2024

9. Kirov Yu.A., Kotov D.N., Milyutkin V.A., Kirov V.Yu., Kirov V.A., Kirova Yu.Z., Denisov S.V., Zhiltsov S.N. Pontoon pump for homogenization and pumping of liquid organic fertilizers: Pat. 212418 Russian Federation, MPK7 A01C 3/00; No. 2022112515; 2022. (In Russ.)

10. Kirov Yu.A., Milyutkin V.A., Kotov D.N., Kirov V.Yu., Ryabtsev A.A., Kirov V.A., Kirova Yu.Z., Denisov S.V. Pontoon pump for homogenization and pumping of liquid organic fertilizers: Pat. 213980 Russian Federation, MPK7 A01C 3/00. No. 2022123625; 2022. (In Russ.)

11. Kirov Yu.A., Milyutkin V.A., Kotov D.N., Kirov V.Yu., Ryabtsev A.A., Kirov V.A., Kirova Yu.Z., Denisov S.V. Pontoon pump for homogenization and pumping of liquid organic fertilizers: Pat. 214495 Russian Federation, MPK7 A01C 3/00. No. 2022123853; 2022. (In Russ.)

12. Kirov Yu.A., Milyutkin V.A., Kotov D.N., Kirov V.Yu., Ryabtsev A.A., Kirov V.A., Kirova Yu.Z., Denisov S.V. Pontoon pump for homogenization and pumping of liquid organic fertilizers: Pat. 214573 Russian Federation, MPK7 A01C 3/00. No. 2022123420; 2022. (In Russ.)

13. Kirov Yu.A., Milyutkin V.A., Kotov D.N., Kirov V.Yu., Ryabtsev A.A., Kirov V.A., Kirova Yu.Z., Denisov S.V. Pontoon pump for homogenization and pumping of liquid organic fertilizers: Pat. 215666 Russian Federation, MPK7 A01C 3/00. No. 2022126341.2022. (In Russ.)

14. Trifanov A.V., Vorozhtsov O.V. Ensuring mixing of liquid swine manure in film manure storage. *Molochnokhozayistvenny Vestnik*. 2017;3(27):125-133. (In Russ.)

15. Trifanov A.V., Vorozhtsov O.V. Theoretical assumptions for calculation of parameters of the device for liquid pig manure mixing in manure storages. *Tekhnologii i Tekhnicheskie Sredstva Mekhanizirovannogo Proizvodstva Produktii Rasteniyevodstva i Zhivotnovodstva*. 2014;85:127-136. (In Russ.)

Author Information

¹ **Yuri A. Kirov**, DSc (Eng), Associate Professor; kirov.62@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-6736-1263>

² **Vladimir A. Milyutkin**, DSc (Eng), Professor; oiapp@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-8948-4862>

³ **Vsevolod Yu. Kirov**, postgraduate student; kirov.vsevolod@gmail.com

⁴ **Andrey A. Ryabtsev**, postgraduate student; ryabtsevaa@yandex.ru

^{1,2,3,4} Samara State Agrarian University: 446442, Russian Federation, Samara Oblast, Kinel, Ust-Kinelsky, Uchebnaya Str., 2

Author Contribution

Yuri A. Kirov – research supervision, conceptualization, research methodology, conclusions; Vladimir A. Milyutkin – research management, writing – review and editing of the manuscript; Vsevolod Yu. Kirov – literature review, data curation, writing – original draft preparation; Andrey A. Ryabtsev – investigation, visualization.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests and are responsible for plagiarism.

Received 04.07.2024; Revised 04.12.2024; Accepted 06.12.2024

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.1

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-20-25>

Применение цифровых двойников технологических машин в АПК при эксплуатации и сервисном обслуживании

А.А. Жиздюк¹, В.Н. Буйлов², С.В. Чумакова³, М.Н. Ахилбеков⁴^{1,2,3} Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова; г. Саратов, Россия⁴ Южно-Казахстанский университет им. М. Ауезова; г. Шымкент, Казахстан¹ a.sgau@mail.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0003-2378-9799>² buylov_62@mail.ru³ ch-sv@yandex.ru⁴ Akhilbekov@mail.ru

Аннотация. Цифровой двойник технологической машины может значительно улучшить эффективность эксплуатации и сервисного обслуживания техники в АПК. Теоретическое исследование проведено с целью выявления эффективности применения цифровых двойников технического состояния сельскохозяйственной техники. Рассмотрена возможность внедрения цифровых двойников технологических машин при их эксплуатации и сервисном обслуживании для автоматизации ремонтных инспекций, оцифровки инженерных знаний по обслуживанию и ремонту, минимизации простоев оборудования, контроля качества и безопасности работ. Приведена формула функциональной зависимости эффективности применения цифровых двойников при эксплуатации и обслуживании. Установлено, что обоснованные решения по техническому обслуживанию и ремонту техники могут приниматься только в случае моделирования цифровым двойником различных вариантов полных и частичных отказов, учета режимов эксплуатации, воздействия окружающей среды и степени износа деталей. Поэтому мы предложили установить на технику RFID-метки и терминалы мониторинга, базирующиеся на GPS, ISOBUS и современном программном обеспечении, которые в режиме реального времени анализируют информацию о соответствии показателей выполняемого процесса заданным параметрам и подают команды и управляющие воздействия оператору машины для коррекции работы трактора, рабочих органов орудий, агрегата. Исследования показали эффективность применения цифровых двойников технического состояния сельскохозяйственной техники, обусловленную снижением расходов на техническое обслуживание, устранение отказов, незапланированный простой и повышение производительности.

Ключевые слова: цифровой двойник, цифровой двойник технологической машины, сервисное обслуживание, ремонт, эффективность, RFID-метки

Для цитирования: Жиздюк А.А., Буйлов В.Н., Чумакова С.В., Ахилбеков М.Н. Применение цифровых двойников технологических машин в АПК при эксплуатации и сервисном обслуживании // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 1. С. 20-25. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-20-25>

ORIGINAL ARTICLE

Application of digital twins of technological farm machines during their operation and maintenance

A.A. Zhizdyuk¹, V.N. Builov², S.V. Chumakova³, M.N. Akhilbekov⁴^{1,2,3} Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov; Saratov, Russia⁴ South Kazakhstan University named after M. Auezov; Shymkent, Kazakhstan¹ a.sgau@mail.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0003-2378-9799>² buylov_62@mail.ru³ ch-sv@yandex.ru⁴ Akhilbekov@mail.ru

Abstract. The digital twin of a technological machine can significantly improve the efficiency of operation and service of farm machinery. The authors carried out theoretical studies to identify the effectiveness of using digital twins in terms of the technical condition of agricultural machinery. The article considers a possibility of using digital twins of technological machines during their operation and maintenance to automate repair inspections,

digitize engineering information on maintenance and repair, minimize equipment downtime, and ensure quality control and the safety of operation. The authors present a functional dependency formula of the efficiency of using digital twins in operation and maintenance. It is established that reasonable decisions on maintenance and repair of equipment can be made only in case of digital twin modeling of various full and partial failures, taking into account operation modes, environmental impact and the wear intensity of parts. Therefore, the authors proposed to install RFID tags and monitoring terminals based on GPS, ISOBUS and modern software. They can analyze in real time information on the compliance of the process indicators to the specified parameters, and give instructions and control actions to the machine operator to correct the operation of tractors, working tools of implements, and units. Studies have shown the effectiveness of using digital twins of agricultural machinery as they can reduce costs for maintenance, elimination of failures, and unplanned downtime, as well as increase productivity.

Keywords: digital twin, digital twins of farm machines, maintenance, repair, efficiency, RFID tags

For citation: Zhizdyuk A.A., Builov V.N., Chumakova S.V., Akhilbekov M.N. Application of digital twins of technological farm machines during their operation and maintenance. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(1):20-25 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-20-25>

Введение

Проект «Цифровое сельское хозяйство» (О создании национальной платформы «Цифровое сельское хозяйство»: приказ Министерства сельского хозяйства РФ от 25 февраля 2020 г. № 84) разработан с целью развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия.

Внедрение в сельское хозяйство нововведений и IT-стартапов позволяет получать максимальную высокую урожайность и обеспечивает финансовую выгоду от инвестиций. За последние два десятилетия Россия вошла в число стран, предлагающих наибольшее количество инноваций с максимальной эффективностью [1]. Среди них – цифровые двойники.

Многие составляющие цифровых двойников уже активно используются на практике. Их интеграция в единую систему обеспечивает новый уровень продуктивности производства и дополнительную прибыль за счет применения цифровых технологий, создания сетевого взаимодействия поставщиков и партнеров, а также внедрения инновационных моделей бизнеса [2]. Цифровые модели позволяют изучать физические объекты и процессы в виртуальной среде, часто – с использованием виртуальной, дополненной и смешанной реальности. Цифровой двойник технологической машины в АПК может значительно улучшить эффективность и безопасность эксплуатации и сервисного обслуживания [3].

Цель исследований: рассмотреть роль и актуальность внедрения цифровых двойников технологических машин в АПК при их эксплуатации и сервисном обслуживании для автоматизации ремонтных инспекций, оцифровки инженерных знаний по обслуживанию и ремонту, минимизации простоев оборудования, контроля качества и безопасности работ.

Материалы и методы

Эффективность применения технологии цифровых двойников технического состояния сельскохозяйственной техники рассматривалась на основе анализа материалов о цифровых решениях в АПК.

Основные принципы применения цифровых двойников на предприятиях и в организациях изложены в ГОСТ Р 57700.22.

Результаты и их обсуждение

Четвертая индустриальная революция базируется на четырех категориях новейших технологических систем (нано-, био-, информационные, аддитивные и когнитивные технологии), взаимодействие которых приводит к возникновению новых технологий, одной из которых является цифровой двойник (ЦД) (Digital Twin). Существуют различные определения цифрового двойника. Самое общее определение дано А.А. Жиздюк¹: «Цифровой двойник технического состояния техники – это реальное отражение всех параметров эксплуатации машин и оборудования с использованием физических данных, виртуальных данных и данных взаимодействия между ними» (рис.).

Предприятия и организации, используя систему управления сервисным предприятием за счет внедрения цифрового двойника, могут повысить конкурентоспособность выпускаемых изделий и ускорить их выход на рынок [4].

Применение цифровых двойников способствует увеличению энергоэффективности и снижению ресурсозатрат. Цифровые двойники могут

¹Жиздюк А.А., Журавлева Л.А., Карпов М.В. Конструирование и расчет наземных транспортно-технологических машин: Учебное пособие. М.: ООО «Научно-издательский центр ИНФРА-М», 2024. 288 с. DOI: 10.12737/1977999. EDN: KGFEEC.



Рис. Модель цифрового двойника технического состояния

Fig. Model of a digital twin of the technical condition

анализировать данные, полученные от установленных на машине датчиков, и предсказывать возможные поломки или сбои, предотвращая неожиданные остановки и снижая время простоя [5], могут предлагать оптимальные графики сервисного обслуживания для снижения затрат на обслуживание и увеличение срока службы машины. Они способны также анализировать большие объемы данных в режиме реального времени и сообщать о потенциальных угрозах оператору, предотвращая несчастные случаи и травмы. Цифровой двойник на основе полученной от датчиков информации может предложить оптимальные настройки для оборудования с целью обеспечения высокого качества выпускаемых изделий, повышения производительности и сокращения потребления ресурсов. Цифровые двойники могут использоваться для удаленного управления машиной, если оператор находится на большом расстоянии от машины или не имеет возможности физически управлять ею [6].

Технологический трансфер является важным и неотъемлемым компонентом инновационного процесса. Государственные лаборатории, научно-исследовательские институты, университеты стремятся к практическому использованию своих исследований. Трансфер способствует налаживанию связей между различными научно-техническими организациями, что позволяет контролировать технологические процессы, снижать себестоимость продукции и т.д.

Для оптимизации процесса контроля за основными параметрами технологического процесса

разработан графический инструмент визуализации Дашборд (англ. *Dashboard* – «панель управления»), который подтягивает информацию из баз данных, таблиц, сервисов аналитики, социальных сетей, структурирует ее и представляет в виде графиков, диаграмм или схем оператору, находящемуся на предприятии. Данный инструмент не подходит, так как в сельском хозяйстве инженер находится в «поле». В данном случае целесообразно применить инструмент «Панель управления» и программу «История поля» (Геомир), в которую мы добавили контроль за сельскохозяйственной техникой, используя системы датчиков и RFID-метки. Контроль технического состояния осуществляется дистанционно с помощью компьютера, планшета или телефона с применением установленного программного обеспечения [3, 7].

Актуальность внедрения цифровых двойников в систему дистанционного мониторинга и контроля сельскохозяйственных угодий и техники можно описать функциональной зависимостью:

$$E^* = E^*(C, \chi), \quad (1)$$

где E^* – эффективность, %; χ – обобщенная характеристика эффективности изделия; C – коэффициент, показывающий наличие цифрового двойника для исследуемого изделия.

Зависимость (1) позволяет определить критические зоны и оптимальное количество датчиков, необходимых для сбора данных, которые будут использоваться для последующей технической эксплуатации и модернизации изделия.

Обобщенная характеристика равна совокупности ее составляющих:

$$\chi = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \chi_{ij}, \quad (2)$$

где χ_{ij} – одна из характеристик изделия на всех стадиях жизненного цикла изделия; i – номер характеристики, $i = \overline{1; n}$; j – номер стадии жизненного цикла изделия, $j = \overline{1; m}$.

Коэффициент C определен следующими условиями:

$$C = \begin{cases} 0, & \text{при отсутствии цифрового двойника для } \chi_{ij} \\ k \neq 0, & \text{при существовании цифрового двойника для } \chi_{ij}, \end{cases} \quad (3)$$

где k – коэффициент, являющийся количественной характеристикой, соответствующей числу стадии жизненного цикла изделия, имеющего числовое двойника.

С учетом (1), (2) и (3) выведен коэффициент эффективности ввода цифрового двойника на той или иной стадиях жизненного цикла изделия $m_{c\chi}$:

$$m_{c\chi} = \frac{C}{\chi}. \quad (4)$$

При использовании коэффициента эффективности получена формула (5), позволяющая связать эффективность жизненного цикла изделия с применением цифровых двойников:

$$E_c^* = m_{c\chi} E^*. \quad (5)$$

Анализ данных [8], рассчитанных с помощью формул, показал эффективность снижения расходов на техническое обслуживание на 25%, устранение отказов на 70%, незапланированный простой на 35% и повышение производительности на 20%.

Формулы (1-5) позволяют подтвердить необходимость применения цифровых двойников технического состояния техники и обоснованность применения тех или иных параметров технического состояния машин и оборудования с помощью системного подхода инжиниринга с использованием предиктивной (предсказательной) аналитики полных и частичных отказов техники. Формулы помогут в создании автоматических рекомендаций применения целевых технических параметров для прогнозирования определенных состояний техники в предиктивных моделях.

Внедрение технологии цифрового двойника технического состояния техники на этапе эксплуатации машин и оборудования позволяет дистанционно осуществлять диагностику и прогнозирование неисправностей, повысить эффективность работы техники, проводить перекалибровку, выявить новые потребности клиента. Эта многофизичная точная модель позволяет учитывать и оптимизировать

взаимодействие всех элементов с учетом режимов работы и воздействий окружающей среды. Программное обеспечение с информационным интерфейсом технического состояния машин и оборудования позволит планировать применение техники в зависимости от ее функциональных характеристик и технического состояния и принимать обоснованные решения относительно ее технического обслуживания и ремонта. В качестве характеристик рекомендуется использовать экологические показатели (дымность, выбросы вредных веществ), удельный расход топлива, давление и расход масла, температуру системы охлаждения и др.

Сельскохозяйственная техника функционирует в сложных эксплуатационных и климатических условиях, что может привести к сбоям в ее работе или неполному выполнению задач [6]. Нельзя исключать и человеческий фактор, который может повлиять на точность выполнения запланированных операций. Даже небольшие отклонения от установленных норм и задержки в период посевных работ могут привести к дополнительным финансовым убыткам и потере урожая. Контроль сельскохозяйственной техники, осуществляемый с помощью установленных на ней системы датчиков, RFID-меток и терминалов мониторинга, может предотвратить перечисленные проблемы. Терминалы, базирующиеся на GPS, ISOBUS и современном программном обеспечении, в режиме реального времени анализируют информацию о соответствии показателей выполняемого процесса заданным параметрам и подают команды и управляющие воздействия оператору машины для коррекции работы трактора, рабочих органов орудий, агрегата.

Указанная технология позволит комбинировать и координировать работу машинно-тракторных агрегатов, автоматизировать настройку машин и орудий на различные технологические операции, осуществлять обмен данными между системами, находящимися в полевых условиях, и офисным компьютером сельхозпредприятия, между электронными системами различных производителей. Технология предоставляет возможность автоматического управления некоторыми функциями и компонентами трактора, оптимизации маршрутов транспорта и работы технических служб.

Из вышеизложенного следует, что применение платформ цифровых двойников технического обслуживания, ремонта и эксплуатации техники является обоснованным и необходимым. Цифровой двойник технологических машин в АПК должен обеспечивать проведение ряда операций: планирование технического обслуживания и ремонта; мониторинг

эксплуатационных характеристик; управление и моделирование ситуаций; визуализацию физических данных, получаемых через средства коммуникации; анализ экономических показателей энергоэффективности и ресурсозатрат при эксплуатации техники; получение данных по остаточным моторесурсам систем, оптимизации, последствиям работы техники в виртуальном режиме; сервисное обслуживание.

Выводы

Цифровой двойник технического обслуживания, ремонта и эксплуатации техники является инструментом, позволяющим моделировать различные варианты полных и частичных отказов, работу

устройств с учетом режимов их работы, воздействий окружающей среды и разной степени износа деталей, принимать обоснованные решения о техническом обслуживании и ремонте техники. В зависимости от технического состояния машин и оборудования цифровой двойник автоматизирует эти процессы с помощью компьютерных технологий.

Обусловлена необходимость применения цифровых двойников технического состояния техники, показана обоснованность применения параметров технического состояния машин и оборудования с помощью системного подхода инжиниринга с использованием предиктивной аналитики полных и частичных отказов техники.

Список источников

1. Абрамов В.А., Жиздюк А.А., Хитрова Н.В. Разработка рекомендаций по повышению энергообеспеченности АПК Саратовской области за счет использования возможностей вторичного рынка техники // Депонированная рукопись № 138-B2013. 16.05.2013. EDN: UYKLSL
2. Голубев И.Г., Быков В.В., Голубев М.И. и др. Возможности использования цифровых двойников в ремонтно-обслуживающем производстве // Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК: Материалы XV Международной научно-практической конференции, р.п. Правдинский, Московская обл., 8 июня 2023 г. М.: Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса, 2023. С. 773-779. EDN: BAABXE
3. Жиздюк А.А., Буйлов В.Н., Чумакова С.В. Цифровые решения для полевых работ // Вавиловские чтения-2023: Сборник статей Международной научно-практической конференции, посвященной 136-летию со дня рождения академика Н.И. Вавилова, г. Саратов, 23-25 ноября 2023 г. Саратов: Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова, 2023. С. 296-303. EDN: КННРWN
4. Севрюгина Н.С., Апатенко А.С. Интеграция профилей цифровых двойников технологических машин в сфере эксплуатации и сопровождения // Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК: Материалы XV Международной научно-практической конференции, р.п. Правдинский, Московская обл., 8 июня 2023 г. М.: Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса, 2023. С. 84-91. EDN: BTHBCT
5. Ерохин М.Н., Дорохов А.С., Катаев Ю.В. Интеллектуальная система диагностирования параметров технического состояния сельскохозяйственной техники // Агроинженерия. 2021. № 2 (102). С. 45-50. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-2-45-50>
6. Буйлов В.Н., Чумакова С.В., Жиздюк А.А. Математическое моделирование в исследовании структуры почвы // Вавиловские чтения-2023: Сборник статей Международной научно-практической конференции, посвященной 136-летию со дня рождения академика Н.И. Вавилова, г. Саратов, 23-25 ноября 2023 г. Саратов: Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова, 2023. С. 105-111. EDN: GLKLXQ
7. Макаров С.В., Иванова А.С., Балебин Д.И. и др. Информационные технологии в управление качеством // Молодые

References

1. Abramov V.A., Zhizdyuk A.A., Khitrova N.V. Development of recommendations to improve energy supply of the agro-industrial sector of the Saratov region by using the opportunities of the secondary market of machinery. Deposit manuscript No. 138-V2013 March 16, 2013.
2. Golubev I.G., Bykov V.V., Golubev M.I. et al. Possibilities of using digital twins in repair and maintenance production. *Scientific and Information Support of the Innovative Development of Agroindustrial Sector: Proceedings of the XV International Scientific and Practical Conference*, Pravdinskiy, Moscow region, June 08, 2023. Moscow, Russian Research Institute of Information and Technical and Economic Research on Engineering and Technical Support of Agroindustrial Sector, 2023. P. 773-779.
3. Zhizdyuk A.A., Builov V.N., Chumakova S.V. Digital solutions for field work. *Vavilov Readings – 2023: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 136th anniversary of Academician N.I. Vavilov*, Saratov, November 23-25, 2023. Saratov, Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov, 2023. P. 296-303.
4. Sevryugina N.S., Apatenko A.S. Integration of profiles of digital twins of technological machines in the field of operation and maintenance. *Scientific and Information Support of the Innovative Development of Agroindustrial Sector: Proceedings of the XV International Scientific and Practical Conference*, Pravdinskiy, Moscow region, June 08, 2023. Moscow, Russian Research Institute of Information and Technical and Economic Research on Engineering and Technical Support of Agroindustrial Sector, 2023. P. 84-91.
5. Erokhin M.N., Dorokhov A.S., Kataev Yu.V. Intelligent system for diagnosing the parameters of the technical condition of tractors. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2021;2(102):45-50. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-2-45-50>
6. Builov V.N., Chumakova S.V., Zhizdyuk A.A. Mathematical modeling in the study of soil structure. *Vavilov Readings – 2023: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 136th anniversary of Academician N.I. Vavilov*, Saratov, November 23-25, 2023. Saratov, Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov. P. 105-111.
7. Makarov S.V., Ivanova A.S., Balebin D.I., Gos T.O. Information technologies in quality management. *Young Scientists' Contribution to the Development of the National Technological Initiative (SEARCH)*, 2022;1:860-862.
8. Pasyuta A.P., Mukhortov. M.A., Pelymskaya I.S. Application of digital twin technology in the organization of production

ученые – развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК). 2022. № 1. С. 860-862. EDN: MDSVLR

8. Пасюта А.П., Мухортов М.А., Пелымская И.С. Применение технологии Digital Twin в организации производства и техническом обслуживании оборудования // Российские регионы в фокусе перемен: Сборник докладов XV Международной конференции, г. Екатеринбург, 10-14 ноября 2020 г. Екатеринбург: ООО «Издательство УМЦ УПИ», 2021. Т. 2. С. 401-405. EDN: HKDDRX

Информация об авторах

¹ **Жиздюк Андрей Анатольевич**, канд. техн. наук, доцент кафедры «Общеобразовательные дисциплины»; SPIN-код: 9719-8164, AuthorID: 321852; a.sgau@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2378-9799>

² **Буйлов Валерий Николаевич**, доктор техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Общеобразовательные дисциплины»; SPIN-код: 8513-8703, AuthorID: 281410; buylov_62@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0007-4553-6801>

³ **Чумакова Светлана Валентиновна**, канд. техн. наук, доцент кафедры «Общеобразовательные дисциплины»; SPIN-код: 4454-5770, AuthorID: 713475; ch-sv@yandex.ru

⁴ **Ахилбеков Мухат Наршович**, канд. техн. наук, доцент кафедры «Водные ресурсы, землепользование и агротехники»; AuthorID: 264491; Akhilbekov@mail.ru

^{1,2,3} Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова; 410012, Российская Федерация, г. Саратов, пр-кт им. Петра Столыпина, зд.4, стр. 3.

⁴ Южно-Казахстанский университет им. М. Ауезова; 160012, Казахстан, г. Шымкент, пр. Тауке хана, 5

Вклад авторов

А.А. Жиздюк – создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;

В.Н. Буйлов – создание черновика рукописи;

С.В. Чумакова – формальный анализ;

М.Н. Ахилбеков – концептуализация.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат.

Статья поступила 19.06.2024, после рецензирования и доработки 15.12.2024; принята к публикации 18.12.2024

and maintenance of equipment. *Russian Regions in the Focus of Change: Proceedings of the XV International Conference*, Yekaterinburg, 10-14 November 2020. Vol. 2. Yekaterinburg, ООО “Izdatelstvo UMTs UPI”, 2021. P. 401-405.

Author Information

¹ **Andrey A. Zhizdyuk**, CSc (Eng), Assistant Professor, a.sgau@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2378-9799>

² **Valery N. Builov**, DSc (Eng), Assistant Professor, buylov_62@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0007-4553-6801>

³ **Svetlana V. Chumakova**, CSc (Eng), Assistant Professor, ch-sv@yandex.ru

⁴ **Mukhat N. Akhilbekov**, CSc (Eng), Assistant Professor, Akhilbekov@mail.ru

^{1,2,3} Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov, 410012, Russian Federation, Saratov, Pyotr Stolypin Ave., 4, building 3.

⁴ M. Auezov South Kazakhstan University; Kazakhstan, Shymkent, 5, Tauke Khan Ave.

Author Contribution

A.A. Zhizdyuk – writing – review and editing of the manuscript;

V.N. Builov – writing – original draft preparation;

S.V. Chumakova – formal analysis;

M.N. Akhilbekov – conceptualization.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests and are responsible for plagiarism.

Received 19.06.2024; Revised 15.12.2024; Accepted 18.12.2024

ORIGINAL ARTICLE

УДК 631.313.3

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-26-33>

Study of a wide-level spring harrow with parallelogram suspension of the working section

S.D. Shepelev¹, I.P. Troyanovskaya², M.V. Pyataev³, E.V. Shalonkina⁴^{1,2,3,4} South Ural State Agrarian University; Troitsk, Russia¹ shepelev2@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2578-2005>² tripav63@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2763-0515>³ 555maxim@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0844-7574>⁴ vatolinazhenya@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-3654-0653>

Abstract. Spring harrows have become widely used for surface tillage. A significant disadvantage of wide-level harrows is the unevenness of the loosening depth. The new design of the spring harrow with a parallelogram suspension of the working section copies the field microrelief to ensure a uniform loosening depth. The purpose of the study was to check the compliance with agrotechnical requirements of the spring harrow with a parallelogram suspension of the working section. To compile the mathematical model of the working section motion, use was made of the Lagrange equations. As a result, the authors determined the main adjustable technological parameters that affect the traction resistance and the depth of tillage. To verify the agrotechnical indicators, the authors designed a prototype of a spring harrow with the following adjustable parameters: the angle of the spring teeth (30°, 60° and 90°) and the force of the compensation spring unit (4, 6, and 8 kN). The wide-level spring harrow consisted of seven working sections with a width of three m and five rows of teeth with a pitch of 610 mm. The sections are attached to the longitudinal bracket of the frame by two pairs of rods at the front and rear of the frame. Field tests were conducted in the forest-steppe zone of the Southern Urals. Soil type was ordinary chernozem and heavy loam. During the tests, the depth of tillage, traction resistance and force of the adjustment spring block were measured. The traction resistance of a spring harrow with a working width of 21 m ranged from 19 to 45 kN. The average soil ridge after harrowing amounted to 3.4 cm, which meets agrotechnical requirements. Experimental studies have proved that the proposed harrow design satisfies agrotechnical requirements: it provides good soil crumbling at a tillage depth of 2 to 10 cm, stability of operation, and uniformity of loosening depth.

Keywords: wide-level spring harrow, traction resistance, tillage depth, traction resistance of spring harrow, soil ridging, soil microrelief copying

For citation: Shepelev S.D., Troyanovskaya I.P., Pyataev M.V., Shalonkina E.V. Study of a wide-level spring harrow with parallelogram suspension of the working section. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(1):26-33 <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-26-33>

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

Исследование широкозахватной пружинной бороны с параллелограммной подвеской рабочей секции

С.Д. Шепелёв¹, И.П. Трояновская², М.В. Пятаев³, Е.В. Шалонкина⁴^{1,2,3,4} Южно-Уральский государственный аграрный университет; Троицк, Россия¹ shepelev2@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2578-2005>² tripav63@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2763-0515>³ 555maxim@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0844-7574>⁴ vatolinazhenya@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-3654-0653>

Аннотация. Пружинные бороны получили широкое распространение при поверхностной обработке почвы. Неравномерность глубины рыхления является существенным недостатком широкозахватных борон. Разработанная нами конструкция пружинной бороны с параллелограммной подвеской рабочей секции позволяет копировать микрорельеф поля и обеспечивать равномерную глубину рыхления. Исследования проведены с целью проверки выполнения агротехнических показателей работы пружинной бороны с параллелограммной подвеской рабочей секции. Основные регулируемые технологические параметры,

влияющие на тяговое сопротивление и глубину обработки почвы, определялись с помощью математической модели движения рабочей секции, составленной на основе уравнений Лагранжа. Получены зависимости тягового сопротивления и глубины рыхления от регулирующих параметров. Для оценки выполнения агротехнических требований был изготовлен опытный образец пружинной бороны, в котором с помощью винтового механизма регулировался угол наклона пружинных зубьев (30° , 60° и 90°) и менялось усилие блока компенсирующих пружин в диапазоне 4...8 кН. Широкозахватная пружинная борона состояла из 7 рабочих секций шириной 3 м и 5 рядами зубьев с шагом 610 мм. Секции крепятся к продольному кронштейну рамы двумя парами тяг в передней и задней их частях. Полевые испытания проводились в лесостепной зоне Южного Урала. Тип почвы – чернозем обыкновенный тяжелый суглинок. В процессе испытаний замерялись глубина обработки почвы, тяговое сопротивление и усилие блока регулировочных пружин. Установлено, что тяговое сопротивление пружинной бороны при ширине захвата 21 м варьируется в диапазоне от 19 до 45 кН. Средняя гребнистость почвы после прохода бороны составляла 3,4 см. Экспериментально доказано, что предлагаемая борона отвечает агротехническим требованиям: обеспечивает хорошее крошение почвы при глубине обработки от 2 до 10 см, стабильность работы и равномерность глубины рыхления.

Ключевые слова: широкозахватная пружинная борона, тяговое сопротивление, глубина обработки почвы, тяговое сопротивление пружинной бороны, гребнистость почвы, копирование микрорельефа почвы

Для цитирования: Шепелёв С.Д., Трояновская И.П., Пятаев М.В., Шалонкина Е.В. Исследование широкозахватной пружинной бороны с параллелограммной подвеской рабочей секции // Агроинженерия. 2025. Т. 27. № 1. С. 26-33. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-26-33>

Introduction

Harrowing is a prescribed technological operation used to conserve soil moisture, crush the soil, level the background and distribute crop residues over the surface of the field [1-4]. Spring harrows have found wide application in the cultivation of agricultural crops. They are effectively used for loosening and leveling the soil, weed control, incorporation of mineral fertilizers and distribution of straw over the field surface [5-7]. Straw distribution is of great importance in No-Till technology [8-10].

Wide-level spring harrows have advantages over traditional rigid-type spike-tooth harrows. They have a large number of technological adjustments, cultivate soil with different agricultural background conditions and provide higher unit productivity. The disadvantage of wide-level spring harrows is the unevenness of the soil loosening depth. This drawback is explained by the poor adaptability of the spring harrow section to copying the unevenness of the field relief [11].

The uniformity of the soil cultivation depth depends on the width of the section and the method of its attachment to the implement frame. Spring harrows have a significant working width (21 m and more) for better tractor loading in terms of power. However, increasing the operating width significantly reduces the quality of soil cultivation due to uneven uniformity of deepening the spring teeth [12-13]. The method of attaching the working section to the frame is particularly important.

Our analysis of the designs of wide-level spring harrows has identified the following types of fastening of working sections to the frame (Fig. 1) [14]:

1. *Fastening the working section with chains.* The advantage of this method of fastening is good copying of the unevenness of the field surface microrelief. The disadvantage is the lack of impact on the vertical force of the soil-cultivating section. It is used on the BPG-24 spring harrow. However, the versatility of this machine is considerably lower due to the impossibility of making technological adjustments.

2. *Single-hinged attachment of the working section to the frame* (fig. 1b). This method of attachment used on the Morris and BPG-24.3 spring harrows allows changing the angle of attack of the tooth. However, the hinge increases the transverse unevenness of the processing depth and limits the possibility of technological adjustments.

3. *Rigid fastening of the working section.* Limitation of movement in the longitudinal vertical direction is carried out using loops to ensure a step change in the angle of attack of the teeth. This type of fastening is used on the spring harrows BZGT-8 “Pobeda”.

4. *Fastening with a four-link parallelogram mechanism* implemented on the SolomMaster-21 spring harrow (fig. 1d). The parallelogram mechanism ensures good copying of the field relief by the working section. However, the operation tests showed significant oscillations of the front and rear edges of the section frame during operation. The harrow also features excessive raising of spring teeth when passing over depressions and excessive deepening of spring teeth when

overcoming microrelief elevations [15-16]. This reduces the quality of soil cultivation.

In addition, the diagonally arranged compensating spring is not adjustable in this design. This harrow belongs to medium-type harrows used mainly for straw distribution, as its name implies.

To eliminate the previously mentioned drawbacks, the design of the harrow section with parallelogram suspension was developed [17, 18] (Fig. 2).

The working sections of the experimental harrow are positioned by means of two pairs of rods 4, pivotally

fixed on the longitudinal bracket of frame 2. This technical solution ensures stable operation and uniform depth of soil cultivation.

Additional adjustment of the inclination angle the spring teeth may change the depth of tillage up to 10 cm. We propose a screw-type regulator that uses the principle of a jack. One end of it is attached to the frame of the section and the other end is attached to the tooth support tubes. The screw mechanism changes the regulator length and provides the movement of the spring teeth hangers, thus changing their angles. Such mechanism provides smooth (instead of stepwise) setting of teeth angles in the range from 30 to 90 degrees. The proposed heavy harrow can be used not only for straw distribution, but also for soil loosening.

The reciprocating movement of the working section frame is independent of the harrow frame movement. This technical solution ensures that the spring teeth copy the unevenness of the soil surface. Uniform soil tillage depth is the main agrotechnical indicator of quality soil tillage during harrowing.

The research purpose is to check the performance of agrotechnical indicators of the spring harrow with a parallelogram suspension of the working section.

Materials and methods

Based on the Lagrange equation, we developed a mathematical model of motion that allowed us to identify the main parameters that influence traction resistance [19-20]. To check the compliance with agrotechnical requirements, a prototype of the working section of a spring harrow with parallelogram suspension was also manufactured (Fig. 2) and field tests were conducted.

During field tests, we measured tillage depth, traction resistance and force of the adjusting spring block.

Mathematical model of motion

Let us consider the forces acting on the working section of a spring harrow during soil cultivation (Fig. 3).

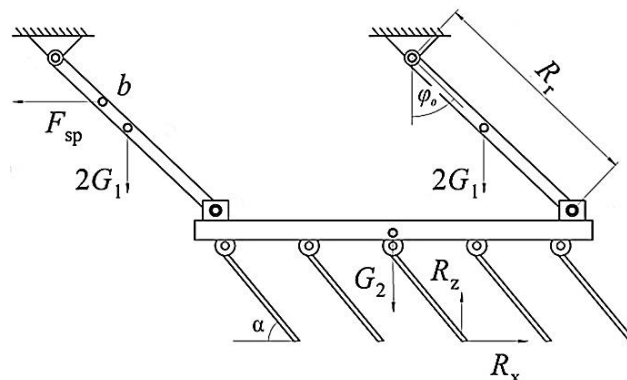


Fig. 3. Scheme of forces acting on the working part of a spring harrow with parallelogram suspension

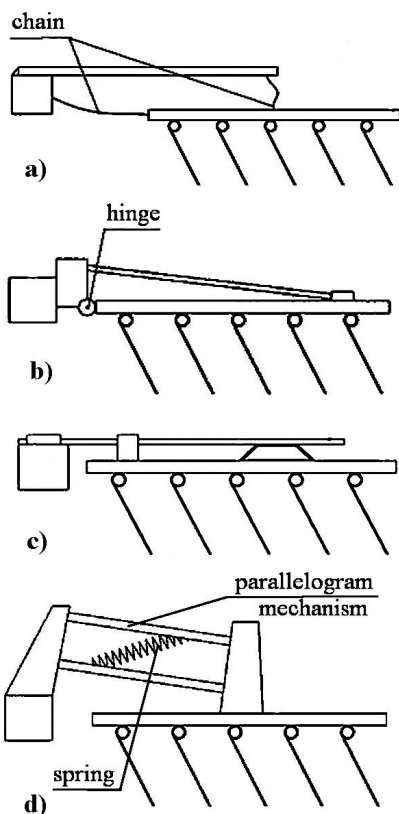


Fig. 1. Methods of fastening the working section to the frame:
a – using chains; b – single-hinged; c – rigid fastening;
d – on a parallelogram mechanism with a transverse spring

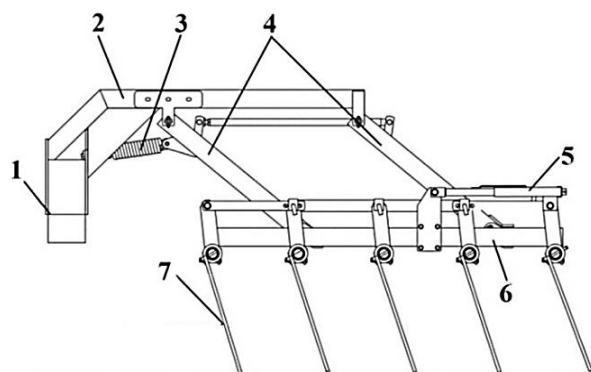


Fig. 2. Sections of a spring harrow with parallelogram suspension:

- 1 – frame; 2 – bracket; 3 – compensation springs;
- 4 – rods; 5 – spring strut angle adjuster;
- 6 – working section frame; 7 – spring teeth.

Let us describe the forces acting on the working section:
 – components of the external force R from the ground side on the spring tooth:

$$\begin{aligned} R_x &= nR \cos(\alpha - \pi/2) \\ R_z &= nR \sin(\alpha - \pi/2), \end{aligned} \quad (1)$$

where α – the angle of setting spring teeth to the horizontal, degree; $n = 5$ – the number of spring teeth installed on the working section.

– elastic force of the adjusting springs is equal to:

$$F_{sp} = ch, \quad (2)$$

where c – spring stiffness, kN/m; $h = 2l_{ab} \sin(\varphi/2)$ – spring deformation, m; φ – inclination angle of the rods, deg; l_{ab} – length of the segment ab on the inclined rod (Fig. 3), defining the point of attachment of the spring on the rod.

– gravity forces:

$$G_1 = gm_1; \quad G_2 = gm_2, \quad (3)$$

where G_1, m_1 – weight and mass of the inclined rod; G_2, m_2 – weight and mass of the frame with spring teeth; $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ – acceleration of gravity.

The system has one degree of freedom. Under the action of forces, the inclined rods perform a rotational movement, and the frame of the working section with spring teeth performs a translational movement. If we take the angle φ of the inclined link deflection as a generalized coordinate, the equations of motion of the working section can take the form of [21]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi} = Q, \quad (4)$$

where $\varphi, \dot{\varphi}$ – generalized coordinate and generalized velocity; Q – generalized force, N; T – kinetic energy of the system, Nm.

The kinetic energy of the system is equal to:

$$T = \dot{\varphi}^2 \left(\frac{2m_1 R_r^2}{3} + \frac{m_2 R_r^2}{2} \right), \quad (5)$$

where $\dot{\varphi}$ – the angular velocity of rotation of the inclined rod, 1/s; R_r is the length of the inclined rod, m.

The generalized force takes the following form:

$$Q = R_r \sin \varphi \left(R_x - \frac{F_{sp} l_{ab}}{R_r} \right) + R_r \cos \varphi (R_z - 2gm_1 - gm_2). \quad (6)$$

Substituting everything into equation (4) we get the equation of motion of the working section of the spring harrow:

$$\begin{aligned} 2\ddot{\varphi} \left(\frac{2m_1 R_r^2}{3} + \frac{m_2 R_r^2}{2} \right) &= \\ &= R_r \sin \varphi \left(R_x - \frac{F_{sp}}{k} \right) + R_r \cos \varphi (R_z - 2gm_1 - gm_2), \end{aligned} \quad (7)$$

where $k = l_{ab} / R_r$ is a design parameter characterizing the location of the attachment of the compensating springs.

Analysis of the solution of differential equation (7) allowed us to identify the main control parameters of the working section that affect the traction resistance of the working section: force of compensation springs F_{sp} and the operating angle of spring teeth relative to the horizon α (Fig. 3).

The traction resistance of the entire spring harrow was determined [22, 23]:

$$R_h = n_s R_x + G_h f, \quad (8)$$

where R_x – the traction resistance of one working section, kN; G_h – the weight of the spring harrow, kN; f – the coefficient of resistance to harrow movement.

Field tests

A prototype of an experimental spring harrow was manufactured to conduct field tests. The weight of a single working section was $G_1 + G_2 = 3.9 \text{ kN}$. The inclined rods had a length of $R_r = 1 \text{ m}$ and an initial angle of inclination of 45° . The experiment was conducted in the forest-steppe zone of the Southern Urals of the Russian Federation (Fig. 4). The soil type is ordinary chernozem (black soil) and heavy loam.

Soil moisture at a depth of up to 5 cm was 19%, at a depth of 5-10 cm it was 27.7%. The soil hardness at a depth of up to five cm was 1.2 MPa, at a depth of 5 to 10 cm it was 1.5 MPa. The speed of the machine and tractor unit during harrowing ranged between 2.2 and 4.4 m/s. The soil was disc-cultivated before harrowing. The spring harrow's working depth was 4 to 8 cm.

Each working section was three m wide and included five rows of teeth with a pitch of 610 mm. The installation of seven working sections on a wide-level spring harrow provided a working width of 21 m.

The range of controlled parameters of the spring harrow was [24-25]: force of the adjusting spring block $F_{sp} = 4$ to 8 kN; angle of spring teeth to the horizon $\alpha = 30^\circ$ to 90° .



Fig. 4. Machine-tractor unit with an experimental spring harrow during field tests

Results and discussion

An increase in the angle of inclination of the spring teeth α is accompanied by an increase in the depth a of processing of the spring teeth. The processing depth a increases by 3 cm with an increase in the operating angle of the spring teeth α by 30° .

Dependence diagrams between the tillage depth a and the angle of inclination of spring teeth α at different forces of the compensating spring block F_{sp} are shown in Figure 5. They are described by second-order polynomials with correlation coefficient $R = 0.9994$.

Increasing the force of the adjusting springs F_{sp} leads to additional deepening of the spring teeth. An increase in the loosening depth is characterized by an increase in traction resistance.

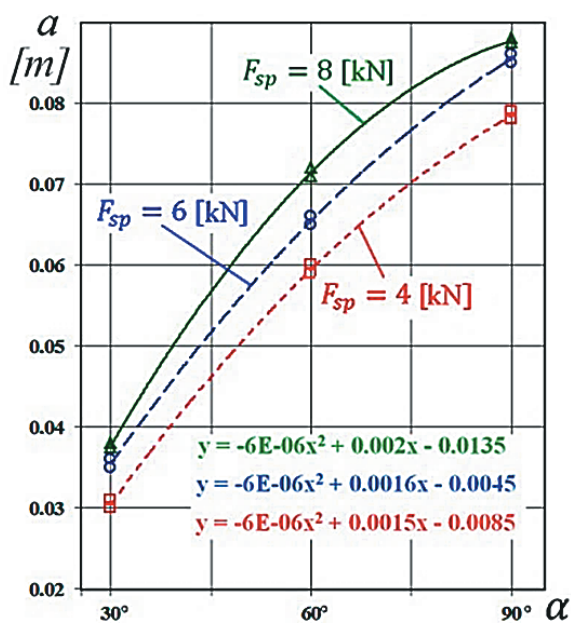


Fig. 5. Dependence of the soil tillage depth a on the angle of the spring teeth α at different forces of the compensating spring block F_{sp}

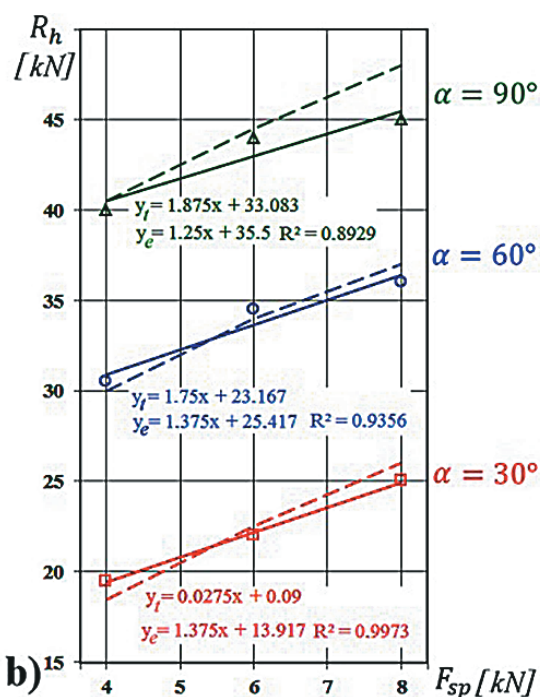
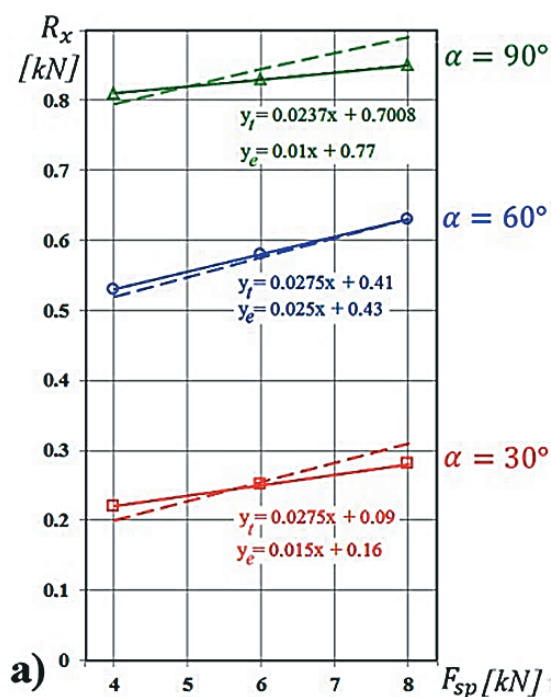


Fig. 6. Dependence of the traction resistance (a) of one working section and (b) of the entire spring harrow on the force of the compensating spring block F_{sp} at different angles of the spring teeth α :

— experiment; - - - theoretical

The relationship between the force of the adjusting spring block F_{sp} and the traction resistance R_x is linear. A consistent increase in the angle α from 30° to 60° and then to 90° contributes to an increase in the traction resistance of the spring harrow by 10 kN. It takes on values of 20 kN, 30 kN and 40 kN (Fig. 6).

An increase in the processing depth is accompanied by an increase in the traction resistance of the working section R_x . An increase in the force of the adjusting springs F_{sp} from 4 kN to 8 kN corresponds to an increase in the processing depth by 0.5 cm. The additional increase in processing depth is on average 1 cm, regardless of the operating angle of the spring teeth α .

Good uniformity of the working tool movement in depth has been experimentally established. The tillage depth varied from 8.7 cm to 9.3 cm at $F_{sp} = 8$ kN and angle $\alpha = 90^\circ$. According to GOST 33687-2015, tillage depth was measured for each section in at least 25 points along the movement trajectory. The scatter of values amounted to only $\pm 3.5\%$. At the operating angle of spring teeth $\alpha = 60^\circ$, the depth changes were observed in the range from 6 cm to 6.6 cm, which corresponds to the scatter of $\pm 5\%$.

Good uniformity of soil cultivation depth is due to the design of the harrow sections, which allows copying the unevenness of the field microrelief. The average soil ridge after harrowing was 3.4 cm (Fig. 7). This meets agronomic requirements, as it is less than the standard ridge depth for a harrow, which is 4 cm [26]. The small value of ridging is due to the high looseness of the soil after preliminary disking.



Fig. 7. Soil (a) before and (b) after tillage with a spring harrow

To evaluate the degree of crumbling, we introduced a crumbling factor

$$K_p = \frac{m_{25}}{m} 100\%,$$

where m – total mass of a soil sample, kg; m_{25} – mass of soil fractions up to 25 mm, inclusively, kg.

An improvement in soil crumbling was experimentally revealed depending on the operating angles of the teeth α . The proportion of soil fractions up to 25 mm in size increased from $K_p = 70\%$ to $K_p = 92\%$, with the angle α increasing from 30° to 90° . Increasing the force of the compensating spring block F_{sp} will further increase the percentage of soil crumbling.

Conclusion

We have developed a new design of the working section of a spring harrow with a parallelogram suspension. The use of a screw mechanism provides for smooth adjustment of the spring tooth angle in the range between 30° and 90° . The parallelogram suspension ensures better quality of copying of the working section with spring teeth relative to the harrow frame due to additional

translational motion and gives additional possibility to regulate the loosening depth. The design novelty is protected by a patent of the Russian Federation.

We have offered a mathematical model of the working section movement to determine the adjustable process parameters that affect the traction resistance and designed a prototype. The angle of inclination of the spring teeth α can be set within the range of 30° ; 60° ; and 90° . The force of the compensating spring block should change in the range of $F_{sp} = 4 - 8$ kN.

Field tests of a spring harrow with a parallelogram suspension were conducted to check the fulfillment of agrotechnical requirements. It was found that the proposed harrow ensures good soil crumbling at a soil cultivation depth of 2 to 10 cm.

The dependences of the traction resistance on the operating angle of spring teeth α and the force of the block of compensating springs F_{sp} were obtained. The traction resistance of the spring harrow with a capture width of 21 m varies in the range from 19 to 45 kN. The average ridge of the soil after the harrow passage was 3.4 cm, which meets the agrotechnical requirements.

References

1. Tarasenko B. et al. Optimization Parameters of Innovative Harrow for Sorgo Production in Burundi. *BIO Web of Conference*. 2023;71:01051. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20237101051>
2. Syromyatnikov Yu., Troyanovskaya I. et al. Productivity of tillage loosening and separating machines in an aggregate with tractors of various capacities. *Journal of Terramechanics*. 2021;98:1-6. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2021.09.002>
3. Sobkowicz P., Tendziagolska E. The effect of timing and intensity of weed harrowing in triticale-lupin mixture on weeds and crops. *Agricultural and Food Science*. 2022;31(1):12-23. <https://doi.org/10.23986/afsci.113476>
4. Ogórek R., Lejman A., Sobkowicz P. Effect of the intensity of weed harrowing with spike-tooth harrow in barley-pea mixture on yield and mycobiota of harvested grains. *Agronomy*. 2019;9(2):103. <https://doi.org/10.3390/agronomy9020103>
5. Syromyatnikov Yu., Khramov N., Troyanovskaya I. et al. Work quality indicators tillage unit with application flexible working body in systems “Organic farming”. *E3S Web of Conferences*. 2023;463:01001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202346301001>

Список источников

1. Tarasenko B. et al. Optimization Parameters of Innovative Harrow for Sorgo Production in Burundi. *BIO Web of Conference*. 2023;71:01051. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20237101051>
2. Syromyatnikov Yu. et al. Productivity of Tillage Loosening and Separating Machines in an Aggregate with Tractors of Various Capacities. *Journal of Terramechanics*. 2021;98:1-6. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2021.09.002>
3. Sobkowicz P., Tendziagolska E. The Effect of Timing and Intensity of Weed Harrowing in Triticale-Lupin Mixture on Weeds and Crops. *Agricultural and Food Science*. 2022;31(1):12-23. <https://doi.org/10.23986/afsci.113476>
4. Ogórek R., Lejman A., Sobkowicz P. Effect of the Intensity of Weed Harrowing with Spike-Tooth Harrow in Barley-Pea Mixture on Yield and Mycobiota of Harvested Grains. *Agronomy*. 2019;9(2):103. <https://doi.org/10.3390/agronomy9020103>
5. Syromyatnikov Yu., Khramov N., Troyanovskaya I. et al. Work Quality Indicators Tillage Unit with Application Flexible Working Body in Systems “Organic Farming”. *E3S Web of Conferences*. 2023;463:01001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202346301001>

6. Zeng Z., Martin A., Chen Y., Ma X. Weeding performance of a spring-tine harrow as affected by timing and operational parameters. *Weed Science*. 2021;69(2):247-256. <https://doi.org/10.1017/wsc.2020.88>
7. Bulgakov V., Kaletnik H., Goncharuk I. et al. Results of experimental investigations of a flexible active harrow with loosening teeth. *Agronomy Research*. 2019;17(5):1839-1845. <https://doi.org/10.15159/ar.19.185>
8. Shepelev S.D., Plaksin A.M., Troyanovskaya I. et al. Theoretical and experimental studies of the tractive resistance of the sowing complex for the no-till technology. *Proceedings of the 8th International Conference on Industrial Engineering. ICIE2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2023:341-350. https://doi.org/10.1007/978-3-031-14125-6_34
9. Aikins K.A., Antille D.L., Jensen T.A. et al. Performance comparison of residue management units of no-tillage sowing systems: A review. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*. 2019;12(2):181-190. <https://doi.org/10.1016/j.eaef.2018.12.006>
10. Celik A., Altikat S. The effect of power harrow on the wheat residue cover and residue incorporation into the tilled soil layer. *Soil and Tillage Research*. 2022;215:105202. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105202>
11. Saeed A.M., Al-Mistawi K.E., Al-Irhayim M.N. Comparison performance of disc harrow and spring harrow at different pulverization speed. *International Journal of Agricultural and Statistical Sciences*. 2020;16(1):1539-1543. <https://connectjournals.com/03899.2020.16.1539>
12. Krylov O.N. et al. Analysis of heavy stubble harrow designs. *Scientific support for the agro-industrial complex: results and prospects*. 2013:124-132. (in Russ.)
13. Bulavintsev R.A., Polohin A.M., Volzhentsev A.V., Kozlov A.V., Pupavtsev I.E. Overview of designs and analysis of harrows with tooth working bodies. *Agrotehnika i Energoobespechenie*. 2022;2(35):30-36. (In Russ.)
14. Pyatayev M.V., Shalonkina E.V. Analysis of methods of fastening working sections of spring harrows to the frame. *Strategii i Vektory Razvitiya APK = Strategies and Development Trends of the Agro-Industrial Sector*. 2021:173-176. (In Russ.)
15. Maslov G., Lavrentiev V., Tsybulevsky V. et al. Optimization of parameters of a multifunctional unit based on a spring harrow. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*. 2019;9(1):1915-1918. <https://doi.org/10.35940/ijeat.A1054.109119>
16. Bulgakov V., Ivanovs S., Bandura V. et al. Experimental investigation of harrow with spring teeth for cultivation of sugar beets. *Engineering for Rural Development*. 2018;17:215-220. <https://doi.org/10.22616/ERDev2018.17.N259>
17. Shepelev S.D., Pyatayev M.V., Shalonkina E.V. Agrotechnical and energy assessment of a wide-reach spring harrow with sections providing uniform depth tillage. *Agro-Food Policy in Russia*. 2023;4(107):44-51. https://doi.org/10.35524/2227-0280_2023_04_44 (In Russ.)
18. Shepelev S.D., Kravchenko E.N., Telichkina N.A., Pyataev M.V., Shalonkina E.V. Spring Harrow. Patent RU2779178 U1. 2022. (In Russ.)
19. Blednykh V.V., Svechnikov P.G., Troyanovskaya I.P. Analytical model of soil pulverization and tillage tools. *International conference on industrial engineering (ICIE-2015). Procedia Engineering*. 2015;129:69-74. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.010>
20. Troyanovskaya I., Grebenshchikova O., Zhitenko I. Process of Soil Destruction: Experimental Results. *International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: Mechanical Engineering and Materials Science (ICMTMTE2019). MATEC Web of Conferences*. 2019;298:00041. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929800041>
21. Чернявский А.Н., Борисенко И.В., Токарев К.Е. Моделирование работы пружинного рабочего органа бороны-лушителя на основе оптимизации зон поперечных колебаний // Известия Нижневолжского аграрного университета. 2021. № 62. С. 482-489. <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2021-02-48>
22. Krylov O.N. et al. Analysis of constructions of heavy stubble harrows // Научное обеспечение АПК: итоги и перспективы. Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 70-летию ФГБОУ ВПО Ижевская ГСХА. Том II. ФГБОУ ВПО Ижевская государственная сельскохозяйственная академия. 2013. С. 124-132. EDN: SXPDTV
23. Булавинцев Р.А., Полохин А.М., Волженцев А.В. и др. Обзор конструкций и анализ работы борон с зубowymi рабочими органами // Агротехника и энергообеспечение. 2022. № 2(35). С. 30-36. EDN: GVMMUL
24. Пятаев М.В., Шалонкина Е.В. Анализ способов крепления рабочих секций пружинных борон к раме // Стратегии и векторы развития АПК. 2021. С. 173-176. EDN: PPOXBP
25. Maslov G., Lavrentiev V., Tsybulevsky V. et al. Optimization of parameters of a multifunctional unit based on a spring harrow. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*. 2019;9(1):1915-1918. <https://doi.org/10.35940/ijeat.A1054.109119>
26. Bulgakov V. et al. Experimental investigation of harrow with spring teeth for cultivation of sugar beets. *Engineering for Rural Development*. 2018;17:215-220. <https://doi.org/10.22616/ERDev2018.17.N259>
27. Шепелёв С.Д., Пятаев М.В., Шалонкина Е.В. Агротехническая и энергетическая оценка широкозахватной пружинной бороны с секциями, обеспечивающими равномерную по глубине обработку почвы // Агропродовольственная политика России. 2023. № 4 (107). С. 44-51. https://doi.org/10.35524/2227-0280_2023_04_44
28. Шепелёв С.Д., Кравченко Е.Н. и др. Весенняя Бороны. Патент 2779178 Р.Ф. от 05.09.2022.
29. Blednykh V.V. et al. Analytical Model of Soil Pulverization and Tillage Tools. *Procedia Engineering*. 2015;129:69-74. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.010>
30. Troyanovskaya I., Grebenshchikova O., Zhitenko I. Process of Soil Destruction: Experimental Results. *MATEC Web of Conferences*. 2019;298:00041. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929800041>
31. Чернявский А.Н., Борисенко И.В., Токарев К.Е. Моделирование работы пружинного рабочего органа бороны-лушителя на основе оптимизации зон поперечных колебаний // Известия Нижневолжского аграрного университета. 2021. № 62. С. 482-489. <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2021-02-48>

21. Chernyavsky A.N., Borisenko I.B., Tokarev K.E. Simulation of the operation of a spring working part of strigely harrow based on optimization of transverse vibration zones. *Proc. of the Lower Volga Agro-University Comp.* 2021;62:482-489. (In Russ.) <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2021-02-48>

22. Bodalev A.P., Ivanov A.G., Kostin A.V., et al. Interaction of spring operating part of heavy tine harrows with soil. *Vestnik NGIEI.* 2020;1:16-30. (In Russ.)

23. Syromyatnikov Yu., Kuts Y., Troyanovskaya A., et al. Transporting ability calculation of the rotor of soil-cultivating loosening and separating vehicle. *Acta Technologica Agriculturae.* 2022;25:73-78. <https://doi.org/10.2478/ata-2022-0012>

24. Fedorenko I.Y. Numerical analytic simulation of tooth fluctuations in a spring-tooth harrow. *Bulletin of Altai State Agrarian University = Vestnik Altayskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta.* 2018;1:162-167. (In Russ.)

25. Bodalev A.P., Ivanov A.G., Kostin A.V. Justification of the parameters and operating modes of a heavy spring stubble harrow. *AgroEcoInfo.* 2018;1:34. (In Russ.)

26. Troyanovskaya I.P., Raznoshinskaya A.V., Kozminykh V.A. et al. Experimental tests of industrial-scale ripping of soil. *Gornyi Zhurnal.* 2021;5:87-90. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2021.05.11>

Authors Information

¹ **Sergey D. Shepelev**, Professor; DSc (Eng); Vice-Rector for Scientific and Innovation Work; shepelev2@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2578-2005>;

² **Irina P. Troyanovskaya**, Professor; DSc (Eng); Department of Tractors, Agricultural Machinery and Soil Cultivation; tripav63@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2763-0515>;

³ **Maxim V. Pyataev**, Associate Professor; CSc (Eng); Department of Operation of the Machine and Tractor Fleet, Technology and Mechanization of Animal Husbandry; 555maxim@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0844-7574>;

⁴ **Evgenia V. Shalonkina**, Postgraduate Student; Department of Operation of the Machine and Tractor Fleet, Technology and Mechanization of Animal Husbandry; vatolinazhenya@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-3654-0653>

^{1,2,3,4} South-Ural State Agro University; Yu.A. Gagarina ulitsa, Troitsk, 457100, Chelyabinsk oblast, Russian Federation

Author Contribution

S.D. Shepelev – research supervision, conceptualization, data verification and validation;

I.P. Troyanovskaya – methodology, formal analysis; writing – original draft preparation, finalizing (review and editing) of the manuscript;

M.V. Pyataev – methodology (sample designing), investigation and formal analysis;

E.V. Shalonkina – resources, investigation and formal analysis

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism.

Received 29.08.2024; Revised 29.11.2024; Accepted 16.12.2024

22. Бодалев А.П., Иванов А.Г., Костин А.В. и др. Взаимодействие пружинных рабочих органов тяжелых зубковых борон с почвой // Вестник НГИЭИ. 2020. № 1(104). С. 16-30. EDN: FKELCU

23. Syromyatnikov Yu., Kuts Y., Troyanovskaya A., et al. Transporting ability calculation of the rotor of soil-cultivating loosening and separating vehicle. *Acta Technologica Agriculturae.* 2022;25:73-78. <https://doi.org/10.2478/ata-2022-0012>

24. Федоренко И.Я. Численно-аналитическое моделирование колебаний зуба пружинной бороны // Вестник алтайского государственного аграрного университета. 2018. № 1(159). С. 162-167. EDN: TAZNIZ

25. Бодалев А.П., Иванов А.Г., Костин А.В. Обоснование параметров и режимов работы тяжелой стерневой пружинной бороны // АгроЭкоИнфо. 2018. № 1(31). С. 34. EDN: XSUVWX

26. Трояновская И.П., Разношинская А.В., Козьминых М.А. и др. Экспериментальные исследования процесса промышленного рыхления грунта // Горный журнал. 2021. № 5. С. 87-90. <https://doi.org/10.17580/gzh.2021.05.11>

Информация об авторах

¹ **Шепелёв Сергей Дмитриевич**, д-р техн. наук; профессор, проректор по научной и инновационной работе; SPIN-код: 4848-4782, AuthorID: 480462; shepelev2@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2578-2005>

² **Трояновская Ирина Павловна**, д-р техн. наук; профессор, кафедра тракторов, сельскохозяйственных машин и земледелия; SPIN-код: 8733-7935, AuthorID: 454467; tripav63@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2763-0515>

³ **Пятаев Максим Вячеславович**, канд. техн. наук, доцент; кафедра эксплуатации машинно-тракторного парка, технологии и механизации животноводства; SPIN-код: 2502-0737, AuthorID: 693225; 555maxim@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0844-7574>

⁴ **Шалонкина Евгения Владимировна**, аспирант; кафедра эксплуатации машинно-тракторного парка, технологии и механизации животноводства; vatolinazhenya@gmail.com; SPIN-код: 3251-2063, AuthorID: 934658; <https://orcid.org/0000-0002-3654-0653>

^{1,2,3,4} Южно-Уральский государственный аграрный университет; д. 13, ул. им. Ю.А. Гагарина, Троицк, 457100, Челябинская обл., Российская Федерация

Вклад авторов

С.Д. Шепелёв – руководство исследованием, концептуализация, верификация данных;

И.П. Трояновская – методология, формальный анализ, создание черновика рукописи, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование, администрирование данных;

М.В. Пятаев – создал опытный образец пружинной бороны; проведение исследования, визуализация;

Е.В. Шалонкина – ресурсы, проведение исследования, формальный анализ

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 29.08.2024, после рецензирования и доработки 29.11.2024; принята к публикации 16.12.2024

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.363

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-34-40>

Инновационные решения технического обеспечения процесса производства комбикормов в фермерских хозяйствах

Т.А. Клевцова^{1✉}, А.В. Гвоздев²^{1,2} Мелитопольский государственный университет; г. Мелитополь, Россия¹ klevtsova1204@yandex.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0001-7319-9266>² gav11gvozdev@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1401-8434>

Аннотация. Производство комбикормов в хозяйствах из собственного зерна позволяет снизить их себестоимость. Создание технологических линий производства комбикормов в виде комплекса технологических модулей с применением гравитационного, инерционного и центробежно-ударного воздействия на кормовые материалы позволит малым зерноперерабатывающим предприятиям получать широкий ассортимент комбикормов высокого качества с низкой себестоимостью. С целью создания высокопроизводительных и малоэнергоёмких кормоприготовительных агрегатов блочно-модульного типа проведен технико-технологический анализ малых зерноперерабатывающих предприятий. В результате нами разработан агрегат блочно-модульного типа, включающий в себя гравитационный сепаратор, через который пропускают зерно (перед измельчением в дробилке прямого удара) и продукты помола (перед приготовлением комбикормов), а также объемный дозатор непрерывного действия с цилиндрическим рабочим органом и высокоскоростной смеситель-увлажнитель. В сравнении с аналогами агрегат позволяет получить такое же качество комбикормов, но с наименьшей потребляемой мощностью (8 кВт) и минимальными затратами при его переналадке на производство заданного вида комбикорма (только открытие и закрытие соответствующих дозаторов). Разработанный агрегат позволит получать широкий ассортимент комбикормов высокого качества с низкой себестоимостью.

Ключевые слова: зерно, комбикорм, агрегат, блочно-модульное построение, качество, энергозатраты, гравитационная сепарация, дробилка прямого удара

Для цитирования: Клевцова Т.А., Гвоздев А.В. Инновационные решения технического обеспечения процесса производства комбикормов в фермерских хозяйствах // Агроинженерия. 2025. Т. 27. № 1. С. 34–40. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-34-40>

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБОУ ВО «Мелитопольский государственный университет» (тема FRRS-2023-0019).

Благодарности. Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

ORIGINAL ARTICLE

Innovative solutions for the technical support of the feed production process in farms

T.A. Klevtsova^{1✉}, A.V. Gvozdev²^{1,2} Melitopol State University; Melitopol, Russia¹ klevtsova1204@yandex.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0001-7319-9266>² gav11gvozdev@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1401-8434>

Abstract. The on-farm production of compound feeds from the farm own grain reduces feed costs. The introduction of technological lines for the production of compound feeds in the form of technological modules using gravitational, inertial and centrifugal impact on feed materials will enable small grain processing enterprises to receive a wide range of compound feeds of high quality at a low cost. In order to design high-performance and low-energy feed preparation units of a block-module type, the authors carried out a technical and technological analysis of small grain processing enterprises. As a result, they have developed a block-module unit, including a gravity separator through which grain passes (before being crushed in a direct impact crusher) and grinding products (before preparing compound feeds), as well as a continuous volumetric dispenser with a cylindrical working body and a high-speed mixer humidifier. Compared with its counterparts, the unit ensures the same quality of compound feeds, but at the lowest power consumption (8 kW) and minimal costs when used for the production

of a given type of compound feed (only opening and closing the corresponding dispensers). The developed unit will make it possible to obtain a wide range of low-cost high-quality compound feeds.

Keywords: grain, feed, unit, block-module design, quality, energy consumption, gravity separation, direct impact crusher

Financing. The work financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the State Assignment of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Melitopol State University" (theme FRRS-2023-0019).

Acknowledgements. The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Klevtsova T.A., Gvozdev A.V. Innovative solutions for the technical support of the feed production process in farms. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(1):34-40 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-34-40>

Введение

Производство комбикормов из собственного зернового сырья в цехах хозяйств способствует уменьшению их себестоимости. Для таких установок нужны небольшие площади и энергозатраты¹. Однако технологии и машины для производства комбикормов в хозяйствах не внедрены в производство².

По расчетам академика РАН В.И. Сыроватка, в хозяйствах должно быть не менее 25,5 тыс. комбикормовых цехов производительностью 5...12 т/ч с возможностью производства в них 41,5...46,7 млн т комбикормов в год.

В составе комбикормов доля зерна составляет до 70% [1]. При производстве качественных комбикормов зерно подвергается энергоемким операциям: очистке, фракционированию, сепарации, измельчению, дозированию, смешиванию. Поэтому разработка новых рабочих органов и машин, адаптированных к многообразию условий современного сельскохозяйственного производства, обладающих минимальными удельными энергозатратами, является актуальной задачей.

Цель исследований: провести технико-технологический анализ малых зерноперерабатывающих предприятий и создать высокопроизводительный и малоэнергоемкий кормоприготовительный агрегат блочно-модульного типа для получения широкого ассортимента комбикормов высокого качества с низкой себестоимостью.

Материалы и методы

Использовались методы системного анализа и научных обобщений, метод аргументации с применением инновационной коммуникации.

¹Краснов И.Н., Филин В.М., Глобин А.Н., Ладьгин Е.А. Производство комбикормов в условиях личных подсобных и фермерских хозяйств: Монография. Волгоград: ФГБОУ ВПО АЧГАА, 2014. 228 с. EDN: YSMVTP.

²Стратегия развития механизации и автоматизации животноводства на период до 2030 года. М.: Росинформагротех, 2015. 152 с. EDN: UKRREV.

Производство высококачественных комбикормов непосредственно в хозяйствах возможно путем применения высокоэффективных цехов и агрегатов, а это требует того, чтобы отечественное машиностроение организовало производство инновационной техники и исследований по разработке высокоэффективных технологий³[2].

Рассмотрены направления развития технологий и технических средств для производства комбикормов на период до 2030 г., которые подразумевают модульное исполнение установок и оборудования (для упрощения их монтажа и обслуживания в однотипных узлах и машинах) и гибкость типоразмерного ряда комбикормовых цехов производительностью 0,5; 1,0; 2,0; 3,0, 8 т/ч (для обеспечения потребности хозяйства в комбикормах от 3,0 до 120 т в сутки) [3].

Проведен анализ оборудования для приготовления комбикормов [2, 4]: АМК-1, МКА-1, АКА-3.322, АП-100, АВАР, Прок, Клад, УПК-0,7, Awila, УМК-Ф-2, ОПК-2, SKIOLD, установки комбикормовые КОМБИНАТ, RIELA, MILL-MIXER, SKIOLD PICCOLO, комбикормовые мини-заводы DOZA, полуприцепные комбикормовые установки РМ 35 и Mix all, самоходные установки для приготовления комбикормов фирм «Полымя Агро» и Awila, недорогой блочно-модульный комбикормовый агрегат марки УЗ-ДКА-1 (ОАО «ВНИИКП») и др. Минимальная однородность смеси у перечисленных кормоприготовительных агрегатов составляет в среднем 90%, но не более 98%. Производительность комбикормовых агрегатов изменяется от 0,2 до 5,0 т/ч. Мощность на привод смесителей, применяемых в комбикормовых агрегатах, составляет у некоторых моделей до 54% от суммарной установленной мощности и не менее 16%. Энергоемкость применяемых смесителей оказывает большое влияние на энергоемкость

³Стратегия развития механизации и автоматизации животноводства на период до 2030 года. М.: Росинформагротех, 2015. 152 с. EDN: UKRREV.

малогабаритных комбикормовых агрегатов в целом, в конечном счете – на стоимость комбикормов [2, 4].

Блочно-модульное построение предприятия и блочно-модульные технологические линии по переработке зерна позволят без остановки производства изменять структуру технологического процесса и корректировать производительность в зависимости от запросов заказчика [5-7].

В источниках [2, 4, 8-12] отмечается возможность улучшения технико-экономических показателей техники для производства комбикорма за счет гравитационного, инерционного и центробежно-ударного воздействия на кормовые материалы.

Результаты и их обсуждение

По причине значительного роста стоимости комбикормовой продукции, предлагаемой комбикормовыми заводами сельскохозяйственным товаропроизводителям, определилась устойчивая тенденция приближения производства комбикормов непосредственно к потребителям комбикормовой продукции и местным сырьевым ресурсам. Приготовление комбикормов непосредственно в хозяйствах позволяет значительно снизить затраты на транспортные операции, шире использовать дешевые местные сырьевые ресурсы и др. Все это позволяет существенно сократить себестоимость производимых комбикормов⁴ [2, 4, 13, 14].

Для снижения суммарной установленной мощности кормоприготовительных агрегатов и себестоимости комбикормов необходимы инновационные решения технического обеспечения процесса приготовления комбикормов.

Решить данный вопрос мы предлагаем применением гравитационной сепарации зерна перед измельчением его в дробилке прямого удара, применением гравитационной сепарации продуктов дробления перед приготовлением комбикормов, инерционно-центробежного смешивания компонентов комбикормов, объемного дозатора непрерывного действия с цилиндрическим рабочим органом, а также за счет универсальности применения кормоприготовительных агрегатов для получения разнообразных видов комбикормов [8-12].

Разработанная конструкция дробилки прямого удара с предварительной сепарацией зерна и продуктов измельчения осуществляет многоступенчатое измельчение зерна в одном рабочем пространстве камеры дробления с отводом продуктов

измельчения заданной крупности и подачей его на повторное измельчение, позволяет для получения модуля помола зерна 1,4...2,0 мм снизить удельную энергоемкость в пальцевой дробилке ДМБ-П с 8,05 до 7,02 кВт·ч/т, в экспериментальной дробилке – с 4,55 до 3,80 кВт·ч/т [10].

Применение разработанного гравитационного сепаратора со щелевыми сепарирующими отверстиями позволяет без энергозатрат снизить нагрузку и повысить качество процесса сепарирования до 88...89% [11].

Мы определили, что перспективным направлением в исследовании устройств для смешивания сыпучих компонентов комбикормов являются устройства, оснащенные горизонтально расположенными винтовыми (шнековыми) рабочими органами и работающие в быстроходном скоростном режиме [12].

Зоотехническими требованиями рекомендуется разная крупность помола ингредиентов комбикормов: мелкий помол со средним размером частиц 0,2...1,0 мм – для свиней; средний помол (1,0...1,8 мм) – для птицы; крупный помол (1,8...2,6 мм) – для крупного рогатого скота. Неравномерность измельченного продукта (коэффициент вариации) согласно действующим требованиям⁵ не должна превышать 10%. Между тем современное технологическое оборудование, а это преимущественно молотковые дробилки, обеспечивает довольно неравномерный фракционный состав продуктов измельчения.

Разработанный агрегат для производства комбикормов (рис. 1) в общем виде представляет собой комбикормовый модуль, составленный из автономных блоков предварительной сепарации зерна (I), измельчения зерна (II), фракционирования продуктов измельчения (III), смешивания компонентов комбикормов (IV) и накопления продукции (V).

Агрегат для производства комбикормов содержит гравитационный сепаратор 1 со щелевыми сепарирующими отверстиями для выделения крупной фракции зерна, входящий в блок I. Крупные фракции зерна собираются в бункер-накопитель 2. Блок II состоит из дробилки 3 прямого удара с сепарацией зерна и продуктов измельчения с размещенным под ней блоком III – фракционирования продуктов измельчения. Блок III включает в себя гравитационный сепаратор (классификатор) в виде конвейера с просеивающей поверхностью 4, причем конвейер выполнен с возможностью регулирования угла его

⁴ Краснов И.Н., Филин В.М., Глобин А.Н., Ладыгин Е.А. Производство комбикормов в условиях личных подсобных и фермерских хозяйств: Монография. Зеленоград: ФГБОУ ВПО АЧГАА, 2014. 228 с. EDN: YSMVTP.

⁵ Испытания сельскохозяйственной техники. Машины для кормопроизводства: СТО АИСТ 1.14.2-2020. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2020. 32 с.

наклона и снабжен вибратором 5. Просеивающая поверхность 4 имеет секционную конструкцию с участками решет, размер отверстий которых возрастает в направлении движения материала и обеспечивает разделение продуктов измельчения на фракции и их сбор в отдельные лотки. Пылевидная фракция с эквивалентным диаметром частиц 0,2...0,4 мм собирается в лоток 6, мелкий помол (1,0...1,2 мм) – в лоток 7, средний помол (1,8...2,0 мм) – в лоток 8, крупный помол (2,6...2,8 мм) – в лоток 9, а недостаточно измельченная фракция сходит с просеивающей поверхности 4 по направляющей 10.

Классификатор имеет дополнительный лоток 11 для микродобавок. Лотки 6, 7, 8, 9 и 11 снабжены дозаторами 12, под которыми размещен блок IV, состоящий из высокоскоростного смесителя-увлажнителя 13 со шнековым рабочим органом 14 и устройства для ввода жидких добавок 15 в готовый комбикорм. Готовый комбикорм накапливается в бункере 16 блока накопления V.

Агрегат для производства комбикормов работает следующим образом: исходное сырье (например, фуражное зерно) направляется в гравитационный сепаратор 1 со щелевыми сепарирующими отверстиями для выделения крупной фракции зерна, которое собирается в бункере 2. Крупное зерно может использоваться для дальнейшей переработки в пищевые продукты.

Зерно, прошедшее предварительную сепарацию, измельчается дробилкой 3 прямого удара с предварительной сепарацией зерна и продуктов измельчения.

Продукты измельчения направляются в гравитационный сепаратор (классификатор) и попадают на просеивающую поверхность 4, где осуществляется их разделение на фракции. Сначала продукты измельчения проходят секцию решета с диаметром отверстий $d = 0,2 \dots 0,4$ мм, и в лоток 6 отводится пылевидная фракция. Далее последовательно продукты измельчения проходят секции решет, которые отделяют мелкий, средний и крупный помол в лотки, соответственно, 7, 8 и 9. Недостаточно измельченная фракция сходит с конвейера 2 по направляющей 10. Дополнительный лоток 11, установленный в классификаторе, предназначен для микродобавок.

Агрегат для производства комбикормов целесообразно применять в специализированных цехах и фермерских хозяйствах с широкой номенклатурой производства комбикормов. Каждую из размерных фракций, полученных в данном агрегате, используют по специальному назначению: пылевидную – для приготовления питательных растворов молодняку скота; мелкую – для получения комбикормов для свиней; среднюю – для молодняка

птицы и крупного рогатого скота; крупную – для получения комбикормов для взрослого поголовья птицы и крупного рогатого скота. Фракция с диаметром более 2,6 мм возвращается на дополнительное измельчение.

Для получения необходимого комбикорма открывают дозаторы 12 соответствующих лотков, и компоненты смеси попадают в высокоскоростной смеситель-увлажнитель 13 со шнековым рабочим

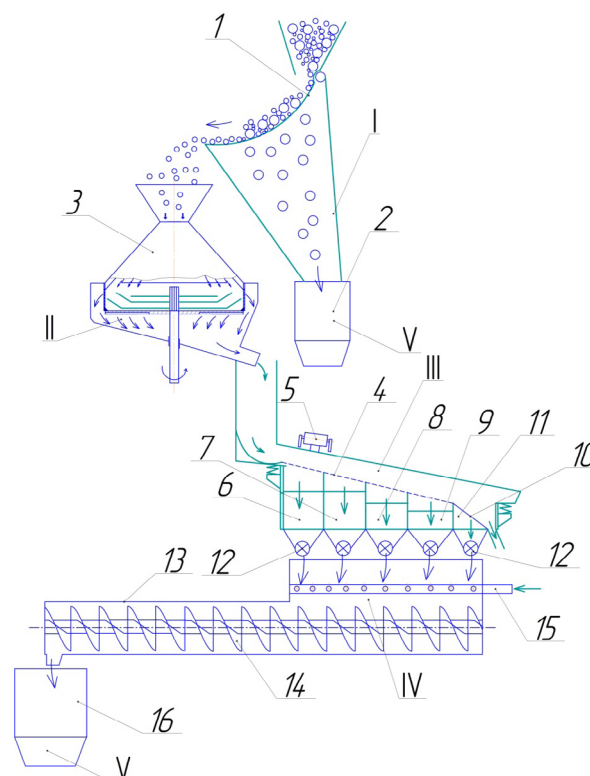


Рис. 1. Агрегат для производства комбикормов:

- I – блок предварительной сепарации зерна;
- II – блок измельчения зерна;
- III – блок фракционирования продуктов измельчения;
- IV – блок смешивания компонентов комбикормов;
- V – блок накопления продукции;
- 1 – гравитационный сепаратор; 2 – бункер-накопитель;
- 3 – дробилка; 4 – гравитационный сепаратор (классификатор);
- 5 – вибратор; 6, 7, 8, 9 – лотки; 10 – направляющая;
- 11 – лоток для микродобавок; 12 – дозатор;
- 13 – смеситель-увлажнитель; 14 – шнековый рабочий орган;
- 15 – устройство для ввода жидких добавок;
- 16 – бункер-накопитель

Fig. 1. Feed production unit:

- I – grain pre-separation unit; II – grain grinding unit;
- III – fractionation unit for grinding products;
- IV – mixing unit for compound feed components;
- V – production accumulation unit; 1 – gravity separator;
- 2 – storage hopper; 3 – crusher; 4 – gravity separator (grader);
- 5 – vibrator; 6, 7, 8, 9 – trays; 10 – guide;
- 11 – tray for microadditives; 12 – dispenser;
- 13 – mixer humidifier; 14 – screw working tool;
- 15 – device for introducing liquid additives;
- 16 – storage hopper

органом 14. Для получения увлажненного комбикорма служит устройство для введения жидких добавок 15. Полученный в смесителе-увлажнителе готовый продукт собирается в бункер 16.

Варианты блочно-модульного построения разработанного агрегата для производства комбикормов в зависимости от специализации и потребности в комбикормах фермерских хозяйств представлены на рисунке 2.

Разработанный агрегат, включающий в себя гравитационный сепаратор и дробилку прямого удара с предварительной сепарацией, по сравнению с аналогами отличается меньшей потребляемой мощностью при том же качестве получаемого комбикорма (табл.).

Агрегат также отличается минимальными затратами, связанными с переналадкой его на производство заданного вида комбикорма (только открытие

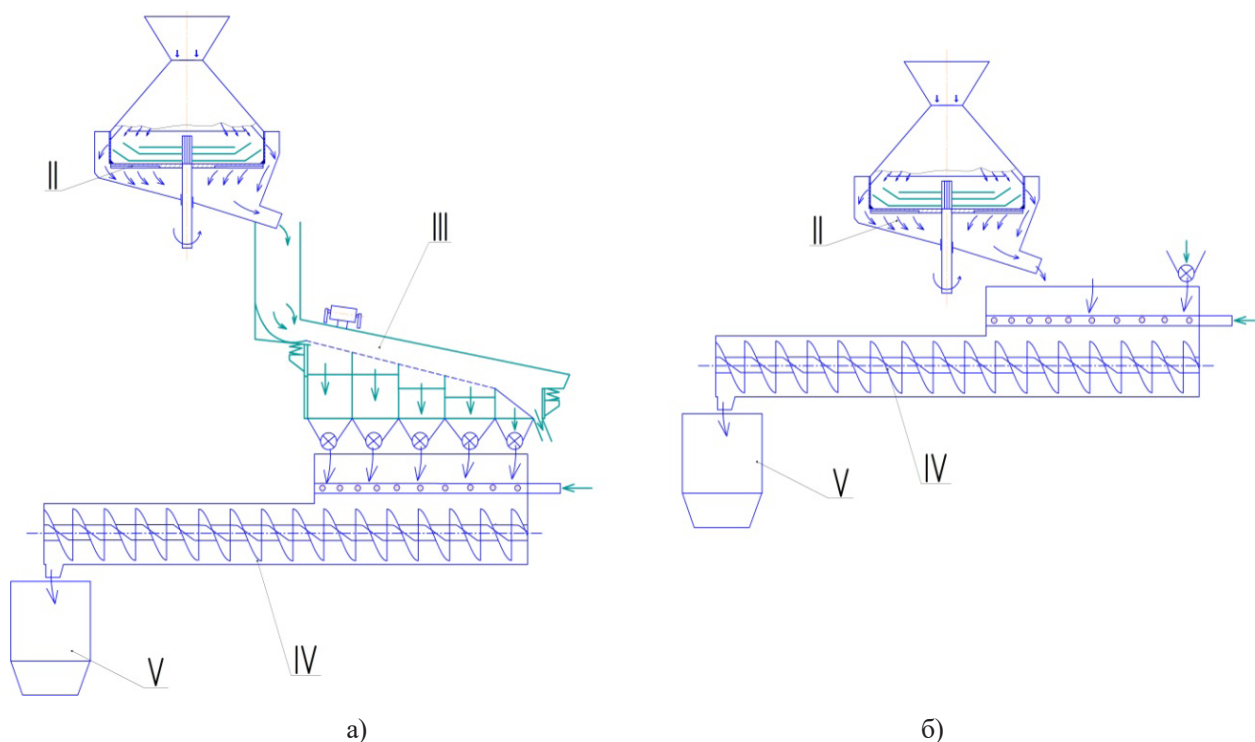


Рис. 2. Варианты блочно-модульного построения разработанного агрегата для производства комбикормов:

а – без блока предварительной сепарации зерна;
б – без блоков предварительной сепарации зерна и фракционирования продуктов измельчения

Fig. 2. Options for the block-module design of the developed unit for the production of compound feeds:
a – without a grain pre-separation unit; b – without units of grain pre-separation and fractionation of grinding products

Таблица

Технологические характеристики агрегатов для приготовления комбикормов

Table

Technological characteristics of units for the production of compound feeds

Марка Brand	Производительность, т/ч Performance, t/h	Вместимость бункера смесителя, м ³ Mixer hopper capacity, m ³	Однородность смешивания, % Uniformity of mixing, %	Общая потребляемая мощность, кВт Total power consumption, kW
У10-ПМК	1,0	1,5	98	38,2
КУ-2-1	1,0	4,0	90	18,5
АКМ-1,0	1,0	1,0	90	16,2
Клад-1,0	1,3...1,5	1,6	90	17,0
МКА-1	1,0	-	90	13,2
Dozamech-1	1,0	2,0	92	9,0
Экспериментальный агрегат Experimental unit	1,0	1,0	92	8,0

и закрытие соответствующих дозаторов), а использование высокоскоростного смесителя-увлажнителя позволяет повысить интенсификацию процесса смешивания и качество комбикормов.

Выводы

1. Создание технологических линий производства комбикормов в виде комплекса технологических модулей, использующих гравитационное, инерционное и центробежно-ударное воздействие

Список источников

1. Сапожников С.Н. Состояние и тенденции развития производства комбикормов // Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК: Материалы IX Международной научно-практической конференции «ИнформАгро-2017». 2017. С. 271-274. EDN: ZMKLFV
2. Садов В.В. Сравнительная оценка комбикормовых агрегатов на этапе концептуального проектирования // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2017. № 10 (156). С. 144-150. EDN: ZIFVBJ
3. Морозов Н.М., Кирсанов В.В. Направления развития технического прогресса в механизации и автоматизации животноводства // Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК: Материалы XV Международной научно-практической конференции. М.: Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса, 2023. С. 29-54. EDN: GPMYKH
4. Ведищев С.М., Кажияхметова А.А., Хольшев Н.В. Анализ малогабаритных комбикормовых агрегатов // Импортосаменяющие технологии и оборудование для глубокой комплексной переработки сельскохозяйственного сырья: Материалы I Всероссийской конференции с международным участием. Тамбов, 2019. С. 135-151. EDN: ICLYHQ
5. Брагинцев С.В., Бахчевников О.Н. Принципы перехода от традиционных технологических линий малых зерноперерабатывающих предприятий к модульным // Таврический вестник аграрной науки. 2019. № 3 (19). С. 31-38. EDN: BUODZE
6. Kampker A., Voet H., Burggraf P., Krunke M., Kreiskotter K. Methodology for the development of modular factory systems. *FAIM Conference Proceedings*. 2014:131-138
7. Rossi F., Arfelli S., Hu S.J.A., Tolio T.A.M., Freiheit T. A systematic methodology for the modularization of manufacturing systems during early design. *Flexible Services and Manufacturing Journal*. 2019;31:945-988. <https://doi.org/10.1007/s10696-019-09338-7>
8. Петров А.А., Шахов В.А., Наумов Д.В., Кондрашов А.Н., Комарова Н.К. Повышение производительности дробилки зерна за счет улучшения сепарации // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2021. № 3 (89). С. 159-162. <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2021-89-3-159-162> EDN: BAFJOJ
9. Клевцова Т.А., Гвоздев А.В., Мирошниченко Я.А. Роль сепарации зерновой смеси в технологическом процессе производства комбикормов // Университетская Наука. 2023. № 2 (16). С. 88-91. EDN: IHFZLS
10. Клевцова Т.А., Пупынин А.А. Поиск конструктивных решений дробилок зерна для повышения эффективности дробления // Вестник аграрной науки Дона. 2024. Т. 17, № 1 (65). С. 22-29. https://doi.org/10.55618/20756704_2024_17_1_22-29

на зерно, позволяет получать широкий ассортимент комбикормов высокого качества с низкой себестоимостью.

2. Разработанный агрегат для производства комбикормов за счет использования гравитационного сепаратора, дробилки прямого удара с предварительной сепарацией зерна и высокоскоростного смесителя-увлажнителя отличается от аналогов меньшей потребляемой мощностью при том же качестве получаемого комбикорма.

References

1. Sapozhnikov S.N. State and tendencies of development of production of compound feeds. Scientific and Information Support of Innovative Development of Agriculture: Proceedings of the IX International Scientific and Practical Conference "InformAgro-2017", 2017:271-274. (In Russ.)
2. Sadov V.V. Comparative evaluation of compound feed units at the stage of conceptual designing. *Vestnik Altaiskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta*. 2017;10:144-150. (In Russ.)
3. Morozov N.M., Kirsanov V.V. Development trends of the technical progress in mechanization and automation of livestock farming. *Scientific and information support of innovative development of agroindustrial sector: Proceedings of the XV International Scientific and Practical Conference*. M.: Russian Research Institute of Information and Technical and Economic Studies on Engineering and Technical Support of Agroindustrial Sector, 2023:29-53. (In Russ.)
4. Vedishchev S.M., Kazhiyakhmetova A.A., Kholshev N.V. Analysis of small feed mill units. *Import-substituting technologies and equipment for deep complex processing of agricultural raw materials: Proceedings of the I All-Russian Conference with international participation*. Tambov. 2019:135-151. (In Russ.)
5. Braginets S.V., Bakhchevnikov O.N. Principles of transition from traditional process lines of small-scale grain processing factories to modular ones. *Taurida Herald of the Agrarian Sciences*. 2019;3:31-38. (In Russ.) <https://doi.org/10.33952/2542-0720-2019-3-19-31-38>
6. Kampker A., Voet H., Burggraf P., Krunke M., Kreiskotter K. Methodology for the development of modular factory systems. *FAIM Conference Proceedings*. 2014:131-138.
7. Rossi F., Arfelli S., Hu S.J.A., Tolio T.A.M., Freiheit T. A systematic methodology for the modularization of manufacturing systems during early design. *Flexible Services and Manufacturing Journal*. 2019;31:945-988. <https://doi.org/10.1007/s10696-019-09338-7>
8. Petrov A.A., Shakhov V.A., Naumov D.V., Kondrashov A.N., Komarova N.K. Increasing the productivity of the grain crusher due to improved separation. *Izvestiya Orenburgskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta*. 2021;3:159-162. (In Russ.) <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2021-89-3-159-162>
9. Klevtsova T.A., Gvozdev A.V., Miroshnichenko Ya.A. The role of grain mixture separation in the technological process of compound feed production. *Universitetskaya Nauka*. 2023;2:88-91. (In Russ.)
10. Klevtsova T.A., Pupynin A.A. Search for constructive solutions for grain crushers to improve crushing efficiency. *Vestnik Agrarnoy Nauki Dona = Don Agrarian Science Bulletin*. 2024;17-1(65):22-29. (In Russ.) https://doi.org/10.55618/20756704_2024_17_1_22-29
11. Gvozdev A.V., Klevtsova T.A., Miroshnichenko Ya.A. Substantiation of the process of gravitational grain separation

11. Гвоздев А.В., Клевцова Т.А., Мирошниченко Я.А. Обоснование процесса гравитационной сепарации зерна методом моделирования // Вестник аграрной науки Дона. 2023. Т. 16, № 4 (64). С. 32–40. https://doi.org/10.55618/20756704_2023_16_4_32-40

12. Клевцова Т.А., Гвоздев А.В. Обоснование конструкции смесителя компонентов комбикормов на основе построения его морфологической модели // Техничко-технологическое обеспечение инноваций в агропромышленном комплексе: Материалы I Международной научно-практической конференции. Мелитополь, 2022. С. 126–129. EDN: UFXKYM

13. Pavkin D.Yu., Shilin D.V., Nikitin E.A., Kiryushin I.A. Designing and simulating the control process of a feed pusher robot used on a dairy farm. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2021;11(22):10665. <https://doi.org/10.3390/app112210665>

14. Резник Е.И., Бестаев Л.З. Электромеханизация приготовления комбикормов в фермерских хозяйствах // Вестник ВИЭСХ. 2012. № 4 (9). С. 43–49. EDN: QBLDIF

Информация об авторах

¹ Клевцова Татьяна Александровна, канд. техн. наук; SPIN-код: 7512-9026, AuthorID: 1191338; klevtsova1204@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7319-9266>

² Гвоздев Александр Викторович, канд. техн. наук, доцент; SPIN-код: 4472-7859, AuthorID: 296047; gav11gvozdev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1401-8434>

^{1,2} Мелитопольский государственный университет; 272312, Россия, г. Мелитополь, пр. Б. Хмельницкого, 18

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат.

Статья поступила 23.04.2024, после рецензирования и доработки 17.10.2024; принята к публикации 13.12.2024

by modeling method. *Vestnik Agrarnoy Nauki Dona = Don Agrarian Science Bulletin*. 2023;16-4(64):32-40. (In Russ.)

12. Klevtsova T.A., Gvozdev A.V. Justification of the design of the mixer of mixed fodder components based on its morphological model. *Technical and Technological Support of Innovations in Agroindustrial Sector: Proceedings of the First International Scientific and Practical Conference*. Melitopol. 2022:126-129. (In Russ.)

13. Pavkin D.Yu., Shilin D.V., Nikitin E.A., Kiryushin I.A. Designing and simulating the control process of a feed pusher robot used on a dairy farm. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2021;11(22):10665. <https://doi.org/10.3390/app112210665>

14. Reznik E.I., Bestaev L.Z. Electromechanization of mixed fodder preparation on farms. *Vestnik VIESKH*. 2012;4:43-49. (In Russ.)

Author Information

¹ Tatyana A. Klevtsova, CSc (Eng); klevtsova1204@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7319-9266>

² Alexander V. Gvozdev, CSc (Eng), Associate Professor; gav11gvozdev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1401-8434>

^{1,2} Melitopol State University; 18 B. Khmel'nitsky Avenue, Melitopol, 272312, Russian Federation.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper and are equally responsible for plagiarism.

Received 23.04.2024; Revised 17.10.2024; Accepted 13.12.2024

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.1:004.048

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-41-52>

Машинное обучение при прогнозировании продуктивности севооборотов

В.К. Каличкин¹, Д.С. Федоров², К.Ю. Максимович³, В.С. Риксен⁴^{1,2,3,4} Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук; р.п. Краснообск, Россия¹ vk.kalichkin@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-7765-3451>² dima.fedorov99@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8678-400X>³ kiri-maksimovi@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9563-4641>⁴ riclog@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9898-4754>

Аннотация. Севооборот способствует поддержанию устойчивых систем земледелия. Применение машинного обучения позволит более эффективно проектировать и прогнозировать продуктивность севооборотов. Традиционные методы обработки данных не отвечают требованиям интеллектуального земледелия. С целью оценки применения машинного обучения выполнено построение моделей прогнозирования продуктивности севооборотов на основе применения 6 алгоритмов: дерево решений (CART); случайный лес (RF); бутстрэп-агрегирование (Bagging); градиентный бустинг (Gradient Boosting); экстремальный градиентный бустинг (Baging XGBoost); искусственная нейронная сеть (ANN). В исследованиях использованы временные ряды данных по продуктивности 9 типов севооборотов на трех уровнях применения техногенных средств, полученные в лесостепи Приобья Новосибирской области Сибирским НИИ земледелия и химизации сельского хозяйства СФНЦА РАН в течение 1999-2019 гг. В качестве дополнительного предиктора в модели был включен показатель атмосферного увлажнения в виде стандартизированного индекса осадков (Standardized Precipitation Index – SPI), рассчитанный как средний показатель атмосферного увлажнения для мая-июля за ротацию каждого из анализируемых севооборотов. Установили, что модели, описывающие продуктивность севооборотов на основе алгоритмов ANN, Gradient Boosting и XGBoost, характеризовались наиболее высокими прогностическими способностями в зависимости от складывающихся условий атмосферного увлажнения и уровня интенсификации технологии возделывания ($R^2 = 0,90 \dots 0,93$). Сравнительный анализ показал, что модель на основе экстремального градиентного бустинга демонстрирует наилучшие показатели с коэффициентом детерминации (R^2) 0,93, среднеквадратичной ошибкой (RMSE) 2,34 и средней абсолютной ошибкой (MAE) 1,81. Продемонстрирована возможность применения методов машинного обучения в качестве эффективного инструментария для прогнозирования продуктивности севооборотов.

Ключевые слова: севооборот, продуктивность севооборотов, прогнозирование, машинное обучение, искусственный интеллект

Благодарности. Авторы выражают признательность Н.В. Васильевой (в.н.с. лаборатории плодородия СФНЦА РАН, канд. с.-х. наук) и Г.М. Захарову (зав. лабораторией севооборотов СФНЦА РАН, канд. с.-х. наук) за предоставленную информацию по полевым опытам с севооборотами.

Для цитирования: Каличкин В.К., Федоров Д.С., Максимович К.Ю., Риксен В.С. Машинное обучение при прогнозировании продуктивности севооборотов // Агроинженерия. 2025. Т. 27. № 1. С. 41-52. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-41-52>

ORIGINAL ARTICLE

Machine learning in predicting crop rotation productivity

V.K. Kalichkin¹, D.S. Fedorov², K.Yu. Maksimovich³, V.S. Riksen⁴^{1,2,3,4} Siberian Federal Scientific Centre of AgroBioTechnologies of the Russian Academy of Sciences; Krasnoobsk, Russia¹ vk.kalichkin@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-7765-3451>² dima.fedorov99@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8678-400X>³ kiri-maksimovi@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9563-4641>⁴ riclog@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9898-4754>

Abstract. Crop rotation contributes to maintaining sustainable farming systems. The application of machine learning will enable more efficient design and prediction of crop rotation productivity. Traditional data processing methods do not meet the requirements of intelligent farming. To evaluate the application of machine learning, models

for predicting crop rotation productivity were built based on six algorithms: decision tree (CART), random forest (RF), bootstrap aggregating (Bagging), Gradient Boosting, extreme gradient boosting (XGBoost), and artificial neural network (ANN). The study used time series data on the productivity of nine types of crop rotations at three levels of technogenic inputs, obtained in the forest-steppe of the Ob region in Novosibirsk Oblast by the Siberian Research Institute of Agriculture and Chemicalization of Agriculture of the SFSCA RAS during 1999-2019. As an additional predictor, the model included an atmospheric moisture indicator in the form of the Standardized Precipitation Index (SPI), calculated as the average atmospheric moisture indicator for May-July over the rotation of each analyzed crop rotation. Models describing crop rotation productivity based on ANN, Gradient Boosting, and XGBoost algorithms were characterized by the highest predictive abilities depending on the prevailing atmospheric moisture conditions and the level of cultivation technology intensification ($R^2 = 0.90 \dots 0.93$). Comparative analysis showed that the model based on extreme gradient boosting demonstrates the best performance with a determination coefficient (R^2) of 0.93, root mean square error (RMSE) of 2.34, and mean absolute error (MAE) of 1.81. The possibility of applying machine learning methods as an effective tool for predicting crop rotation productivity has been demonstrated.

Keywords: crop rotation, crop rotation productivity, forecast, forecasting, machine learning, artificial intelligence

Acknowledgments. The authors express their gratitude to N.V. Vasilyeva (Lead Researcher of the Fertility Laboratory of SFSCA RAS, CSc (Ag) and G.M. Zakharov (Head of the Crop Rotation Laboratory of SFSCA RAS, CSc (Ag)) for providing information on field experiments with crop rotations.

For citation: Kalichkin V.K., Fedorov D.S., Maksimovich K.Y., Riksen V.S. Machine learning in predicting crop rotation productivity. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(1):41-52 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-41-52>

Введение

Севооборот играет центральную роль в поддержании устойчивых систем земледелия. Это связано с тем, что урожайность каждой культуры, а также количество и тип ресурсов, необходимых для достижения планируемой урожайности, зависят не только от технологии возделывания каждой культуры, но и от долгосрочного воздействия культурооборота на физические, химические и биологические факторы окружающей среды, плодородие и фитосанитарное состояние почв. Эти эффекты в первую очередь определяются сочетанием видов сельскохозяйственных культур, частотой их выращивания и последовательностью, а также остаточными эффектами в межвегетационные периоды. Севооборот или сочетание севооборотов в хозяйстве обуславливают достаточно фиксированные потребности в производственных ресурсах: рабочей силе, технике, складских помещениях и т.д., а также в движении денежных средств. Поэтому выбор возделываемых культур и их размещение по территории землепользования в контексте природных и социально-экономических условий хозяйствования на заданном горизонте планирования лежат в основе управления системой земледелия [1, 2]. В этих решениях сконцентрирована вся сложность, связанная с рациональной организацией территории землепользования и формированием системы земледелия на уровне конкретного хозяйства. Правильно спроектированный и последовательно осуществленный севооборот позволяет не только предотвратить деградацию почв, но и мобилизовать питательные вещества в почве, прервать циклы болезней

и ограничить распространение сорняков и вредителей. Как правило, это отражается на урожайности культур и качестве готовой продукции [3-6].

В отечественном научном дискурсе исследования по проблемам севооборотов связаны в основном с оптимизацией структуры землепользования и территориальной организацией севооборотов с помощью линейного программирования [7-11]. Проектирование севооборотов рассматривалось как статичная концепция, в которой решение принимается только один раз при планировании севооборотов, и чаще всего было основано на процедуре оптимизации нескольких или одного (например, экономического) критериев. Учет неопределенности информации определялся в качестве стохастических факторов или вероятности возникновения, но эта вероятность оставалась статической независимо от динамичной эволюции различных ограничений.

В настоящее время в целях научного обеспечения интеллектуального земледелия возникает необходимость усилить исследования по применению машинного обучения, которое является подмножеством искусственного интеллекта. С помощью традиционных методов обработки данных невозможно удовлетворить постоянно растущие требования интеллектуального земледелия, что является важным препятствием для извлечения ценной информации из полевых опытов научных и учебных учреждений. Исследований в этой области недостаточно, а имеющиеся в отечественной научной литературе касаются в основном прогнозирования урожайности сельскохозяйственных

культур с использованием методов глубокого машинного обучения. В качестве примера можно привести работы, в которых используется искусственная нейронная сеть (ИНС) с алгоритмом обратного распространения ошибки [12], ИНС в форме многослойного персептрона MLP [13, 14] и ИНС глубокого обучения со сверточными слоями (СНС) [15]. Статей по использованию алгоритмов машинного обучения для прогнозирования продуктивности севооборотов на основе данных длительных временных рядов полевых опытов в отечественных библиографических базах нами не обнаружено.

В англоязычной литературе исследования по данному направлению представлены довольно широко. В публикациях подчеркивается, что существенные достижения в обработке данных были получены при использовании методов машинного обучения, которые отличаются их способностью обрабатывать различные типы входных данных и решать нелинейные задачи [16, 17]. Кроме того, машинное обучение в отличие от глубокого обучения позволяет проводить его на небольших наборах данных и опирается на вмешательство человека для классификации данных и выделения атрибутов. Машинное обучение функционирует как послушный робот. Закономерности в данных анализируются для дальнейшего их прогноза [18]. Для формирования прогнозных (предиктивных) моделей различных объектов сельского хозяйства используются следующие алгоритмы: дерево решений (DT) [19]; случайный лес (RF) [20]; метод опорных векторов (SVM) [21]; регрессия гауссовского процесса (GPR) [22]; метод К-ближайших соседей (KNN) [23]; ансамблевые методы, включающие в себя различные варианты бустинга [24], и др.

Цель исследований: создание прогнозных моделей продуктивности севооборотов на основе различных алгоритмов машинного обучения и оценки их предиктивной способности.

Материалы и методы

Машинное обучение проводили с использованием данных временных рядов длительных полевых опытов, выполненных в лесостепи Приобья Новосибирской области Сибирским НИИ земледелия и химизации сельского хозяйства СФНЦА РАН в течение 1999-2019 гг. (табл. 1). В опытах изучалось 9 типов севооборотов, ориентированных на производство зерна: А – бессменная пшеница; В – зерновой; С – зерновой с бобовыми (вико-овес на зерно); D – зерновой с масличными (рапс); Е – зернопаровой с яровыми культурами; F – зернопаровой с озимой рожью; G – зернотравяной с озимой рожью и донником; H – зернотравяной (клевер); I – зернотравяной (вико-овес на з/м). Все севообороты реализованы во времени и пространстве в 3-кратной повторности на делянках площадью 475 м², всего экспериментальных полей севооборотов – 104. В расчетах использованы временные ряды продуктивности севооборотов, полученные на трех уровнях применения техногенных средств: 1 – без удобрений и пестицидов; 2 – удобрения + гербициды; 3 – удобрения + фунгицид + гербицид + инсектицид. Для оценки продуктивности севооборотов был произведен перерасчет фактической урожайности возделываемых культур в зерновые единицы (з.ед.) с помощью коэффициентов перевода продукции растениеводства. Атмосферное увлажнение в годы проведения опытов учитывали с помощью стандартизированного индекса осадков (Standardized Precipitation Index – SPI) [25], описываемого формулой:

$$SPI = \frac{p_i - \bar{p}}{p_i}, \quad (1)$$

где p_i – фактическое количество осадков, зафиксированное в определенный период времени i ; $\bar{p}$ – общее среднее значение осадков за весь анализируемый период; p_i – среднее значение осадков за период времени i [25].

Фрагмент таблицы исходных данных, используемых для прогнозирования

Таблица 1

Table 1

Fragment of the initial data table used for forecasting

Уровни интенсификации <i>Intensification levels</i>	<i>SPI</i>	Тип севооборота <i>Crop rotation type</i>	Выход ц з.ед/га площади севооборота <i>Grain output, hwt/crop rotation area, ha</i>
1	–0,96	Бессменная пшеница / <i>Continuous wheat</i>	4,5
1	–0,29	Зернопаровой с яровыми культурами / <i>Grain fallow with spring crops</i>	10,7
2	0,35	Зерновой / <i>Grain</i>	14,0
2	0,32	Зерновой с масличными (рапс) / <i>Grain with oilseeds (rape)</i>	15,0
3	0,66	Зерновой с бобовыми (вико-овес на зерно) / <i>Grain with legumes (vetch-oats for grain)</i>	19,2
3	0,26	Зернопаровой с озимой рожью / <i>Grain fallow with winter rye</i>	25,6

За основной SPI, участвующий в математических расчетах, принят средний показатель атмосферного увлажнения мая-июля за 4 года ротации каждого из проанализированных севооборотов. Для расчетов SPI использованы временные ряды по данным поста метеонаблюдений г. Новосибирска (источником данных был web-ресурс «<http://www.pogodaiklimat.ru>»). Расчеты SPI выполнены в ПО Drought Indices Calculator (DriC) с открытым исходным кодом (<https://drought-software.com>).

Выбор методов статистического анализа данных был обусловлен особенностями структуры и характером распределения исходных данных: несоответствие модели нормальному закону распределения; сравнительно небольшой объем выборки; наличие дискретных и континуальных факторов, сложные нелинейные корреляционные связи. Исходный набор данных включал в себя 462 наблюдения, которые были разделены на обучающую и тестовую выборки в соотношении 80 и 20% соответственно.

Для предварительной обработки данных и выявления наиболее значимых признаков применяли методы непараметрической статистики. В наборе данных присутствуют категориальные (тип севооборота, уровень интенсификации) и количественные (стандартизированный индекс осадков SPI, продуктивность севооборотов) характеристики. Связь типа севооборота с его продуктивностью оценивалась с помощью критерия Краскела-Уоллиса (H-test). Для оценки связи продуктивности севооборота с количественными характеристиками применяли ранговый коэффициент корреляции Спирмена и дисперсионный анализ (ANOVA). Уровень значимости (p-значение) оценивали на уровне 0,05. В ходе исследований построены модели, включающие в себя дерево решений (алгоритм Classification and Regression Tree – CART), случайный лес (алгоритм Random Forest), бутстрэп-агрегирование (алгоритм Bagging), градиентный бустинг (алгоритм Gradient boosting) и его вариацию – экстремальный градиентный бустинг (алгоритм EXtreme Gradient Boosting – XGBoost), а также искусственная нейронная сеть (ANN).

Дерево решений – это алгоритм машинного обучения, который строит модель классификации или регрессии в виде древовидной структуры, где каждый внутренний узел представляет собой условие на значения признаков, ветви отражают результат проверки, а листья содержат выходные значения [26]. Общий вид модели дерева решений можно представить следующей формулой:

$$f(x) = \sum_{m=1}^M c_m \mathbb{I}(x \in R_m), \quad (2)$$

где x – входной вектор; R_m – m -й регион (лист дерева); c_m – константа, соответствующая региону R_m ; $\mathbb{I}$ – индикаторная функция; M – общее число листьев [26].

Случайный лес – это ансамблевый метод машинного обучения, который строит множество деревьев решений на случайных подвыборках обучающего набора данных и усредняет результаты для повышения точности прогнозирования и контроля переобучения [27]. Общая формула модели случайного леса –

$$f(x) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N f_n(x), \quad (3)$$

где $f_n(x)$ – n -е дерево решений; N – общее число деревьев в ансамбле [27].

Бутстрэп-агрегирование – это ансамблевый метод машинного обучения, который комбинирует множество моделей, обученных на случайных подвыборках исходного набора данных с помощью бутстрэпа, и усредняет их прогнозы для повышения точности и стабильности [28]. Общий вид модели бутстрэп-агрегирования:

$$f(x) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M f_m(x), \quad (4)$$

где $f_m(x)$ – модель, обученная на n -й бутстрэп-выборке; M – общее число моделей в ансамбле [28].

Градиентный бустинг – это ансамблевый метод машинного обучения, который строит модель в виде ансамбля слабых предикторов, обычно деревьев решений, последовательно добавляя их к ансамблю и корректируя ошибки предыдущих моделей с помощью градиентного спуска [29].

Экстремальный градиентный бустинг – это усовершенствованный алгоритм машинного обучения, представляющий собой оптимизированную распределенную реализацию градиентного бустинга [29]. XGBoost эффективно применяет принципы параллельного построения деревьев решений (известного также как GBDT или GBM) в рамках парадигмы градиентного бустинга. Общая формула модели градиентного бустинга:

$$f(x) = \sum_{m=1}^M \gamma_m h_m(x), \quad (5)$$

где $h_m(x)$ – базовый предиктор (дерево решений); γ_m – коэффициент усадки, регулирующий вклад каждого дерева; M – число итераций бустинга [29].

Искусственная нейронная сеть – это модель машинного обучения, состоящая из взаимосвязанных узлов (нейронов), организованных в слои, которая может обучаться на данных для решения задач регрессии и классификации [30]. Общий вид модели искусственной нейронной сети –

$$y = f\left(\sum_{n=1}^N w_n x_n + b\right), \quad (6)$$

где x_n – входные значения; w_n – веса; b – смещение; f – функция активации; N – число входов [30].

Оценку производительности моделей проводили с использованием трех статистических параметров: MAE, RMSE и R^2 соответственно, используя в качестве известных параметров: y – истинное значение; $\hat{y}$ – прогнозируемое значение; $\bar{y}$ – среднее значение истинных значений; N – размер выборки.

MAE (Mean Absolute Error) – средняя абсолютная ошибка. Эта метрика измеряет среднее абсолютное отклонение прогнозируемых значений от истинных:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i - \hat{y}_i|. \quad (7)$$

RMSE (Root Mean Squared Error) – корень из среднеквадратичной ошибки. Это метрика, которая измеряет стандартное отклонение ошибок между прогнозируемыми и истинными значениями:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}. \quad (8)$$

R^2 (R Squared) – коэффициент детерминации. Эта метрика измеряет долю дисперсии зависимой переменной, которая объясняется независимыми переменными. Он может принимать значения от 0 до 1, где 1 означает идеальное совпадение прогнозов и истинных значений:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}. \quad (9)$$

Статистические расчеты и графические построения выполнены средствами языка программирования Python в интерактивном блокноте Jupyter, а также средствами языка программирования для статистической обработки данных и работы с графикой R в интегрированной среде разработки R-Studio. Модели продуктивности севооборотов реализованы в авторской программе Crop Yield Analysis & Forecast (CYAF) [31, 32].

Результаты и их обсуждение

Концептуализация подхода «Прогнозирование продуктивности севооборотов», представляющая детальную информацию из 8 основных шагов от этапа подготовки данных – формирования архитектуры, обучения и тестирования моделей – к прогнозированию продуктивности севооборотов, представлена на рисунке 1.

Ключевыми этапами исследований являются:

1. Сбор и предобработка данных включая формирование временных рядов продуктивности севооборотов и атмосферного увлажнения (SPI).

2. Анализ данных и инжиниринг признаков для выявления значимых предикторов и формирования репрезентативного набора данных.

3. Выбор и оптимизация моделей машинного обучения включая линейные модели, ансамблевые методы и нейронные сети.

4. Оценка и интерпретация результатов с использованием метрик эффективности (RMSE, MAE, R^2) и методов интерпретации моделей.

Особое внимание уделяется этапу обучения и оптимизации моделей, когда для повышения точности прогнозирования применяются методы кросс-валидации и подбора гиперпараметров. Итеративный характер процесса обеспечивается обратными связями между этапами, позволяя корректировать выбор признаков и настройки моделей на основе полученных результатов. Заключительные этапы включают в себя развертывание модели и ее непрерывное улучшение, что обеспечивает практическую применимость и адаптивность подхода к изменяющимся агроэкологическим условиям.

На основе эвристического подхода были выделены признаки, определяющие продуктивность севооборотов. Предварительный анализ данных выявил статистически значимую связь ($p < 0,05$) между продуктивностью севооборотов и тремя факторами: атмосферным увлажнением, выраженным через SPI; уровнем интенсификации технологии возделывания; типом севооборота. Графики зависимости демонстрируют характер этих взаимосвязей (рис. 2).

Анализ графиков зависимости продуктивности севооборотов от ключевых факторов в лесостепи Приобья за период 1999-2019 гг. выявил следующие закономерности:

1. Влияние атмосферного увлажнения (рис. 2а). Наблюдается линейная зависимость между стандартизированным индексом осадков (SPI) и продуктивностью севооборотов ($p < 0,05$), что указывает на умеренную положительную связь двух переменных. С увеличением SPI наблюдается пропорциональный рост продуктивности севооборотов, что подчеркивает лимитирующую роль влагообеспеченности для условий лесостепной зоны юга Западной Сибири.

2. Влияние уровня интенсификации (рис. 2б). График демонстрирует устойчивый рост продуктивности при переходе от низкого к высокому уровню использования техногенных ресурсов (интенсификация земледелия). Это свидетельствует о значительном потенциале повышения урожайности культур в севообороте за счет интенсификации агротехнологий.

3. Влияние типа севооборота (рис. 2в). Наблюдаются существенные различия в продуктивности между различными типами севооборотов. Наибольшая продуктивность получена при реализации зерноотраважных севооборотов, особенно с включением клевера (тип Н) и комбинации озимой ржи с донником (тип G). За ними следуют зерноотраважной с вико-овсом на з/м (I), зерновой с бобовыми (С), зернопаровой с озимой рожью (F), зерновой (В),

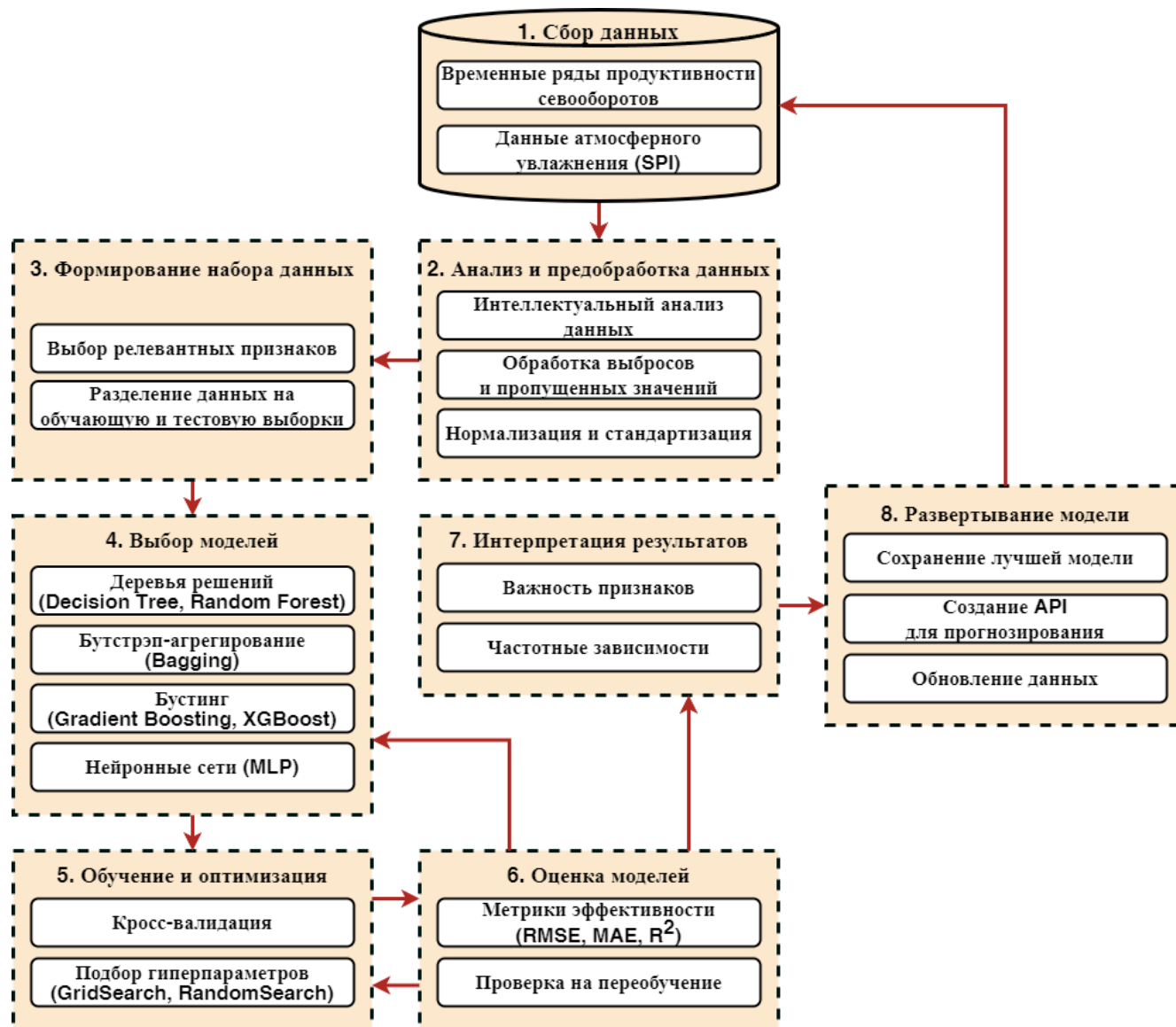


Рис. 1. Концептуальная основа исследования, объясняющая методологию проектирования предиктивных моделей для прогнозирования продуктивности севооборотов с использованием временных рядов данных многолетних стационаров СФНЦА РАН и методов машинного обучения

Fig. 1. Conceptual framework of the study, explaining the methodology for designing predictive models to forecast crop rotation yield using time series data from long-term stationary experiments of SFSCA RAS and machine learning methods

зернопаровой с яровыми культурами (Е), зерновой с масличными (Д), и наименее продуктивным оказалось бессменное возделывание пшеницы (А).

Высокая продуктивность зернотравяных севооборотов может быть объяснена благоприятным воздействием многолетних трав на структуру и плодородие почвы, а также обогащением почвы азотом за счет симбиотической азотфиксации на бобовых. Низкая эффективность бессменного возделывания пшеницы подтверждает необходимость научно обоснованного чередования культур.

Метрика важности переменных модели случайного леса, измеряющая среднее снижение точности при перестановке входных признаков [27], показала значимые результаты для всех выбранных предикторов (рис. 3).

Результаты анализа важности отдельных признаков с помощью алгоритма RF показали, что атмосферное увлажнение, выраженное через «SPI», обладает наибольшим значением чистоты узла. Это свидетельствует о его ключевой роли при прогнозировании продуктивности севооборотов. Переменные «уровень интенсификации» (характеризующий комплексность использования техногенных ресурсов) и «тип севооборота» (зерновые, зернопаровые, зернотравяные и др.) также являлись статистически значимыми (во всех случаях $p < 0,05$), но их вклад в увеличение чистоты узлов несколько меньший, чем у «SPI». Результаты предварительной работы были использованы в дальнейшем при построении предиктивных моделей продуктивности севооборотов.

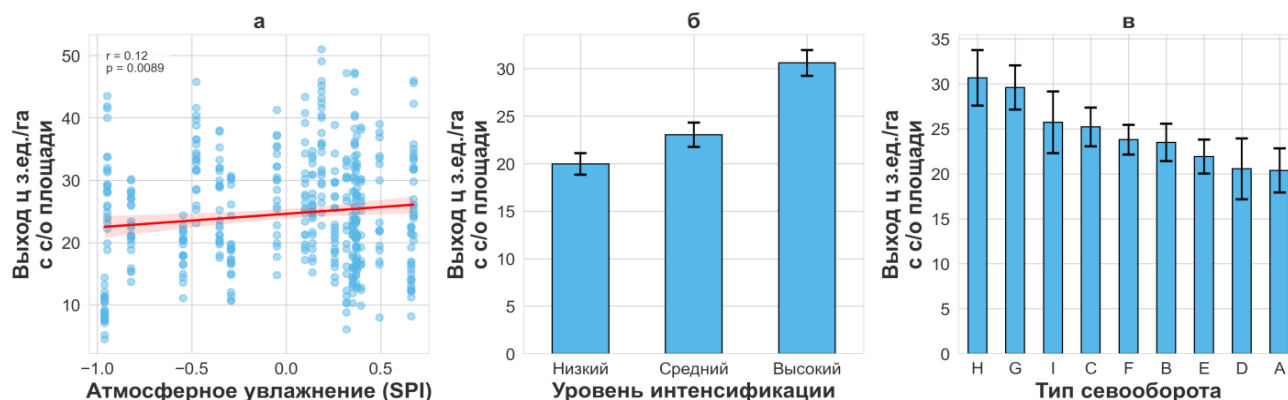


Рис. 2. Зависимость показателя продуктивности севооборотов от атмосферного увлажнения (а), уровня интенсификации (б), типа севооборота (в):

А – бессенная пшеница; В – зерновой; С – зерновой с бобовыми (ви́ко-овес на зерно); D – зерновой с масличными (рапс); E – зернопаровой с яровыми культурами; F – зернопаровой с озимой рожью; G – зернотравяной с озимой рожью и донником; H – зернотравяной (клевер); I – зернотравяной (ви́ко-овес на 3/м)

Fig. 2. Graphical relationship between crop rotation productivity indicators and selected predictors – atmospheric moisture (a), intensification level (b), type of crop rotation (c):

A – continuous wheat, B – grain, C – grain with legumes (vetch-oats for grain), D – grain with oilseeds (rapeseed), E – grain-fallow with spring crops, F – grain-fallow with winter rye, G – grain-grass with winter rye and melilot, H – grain-grass (clover), I – grain-grass (vetch-oats for green mass)

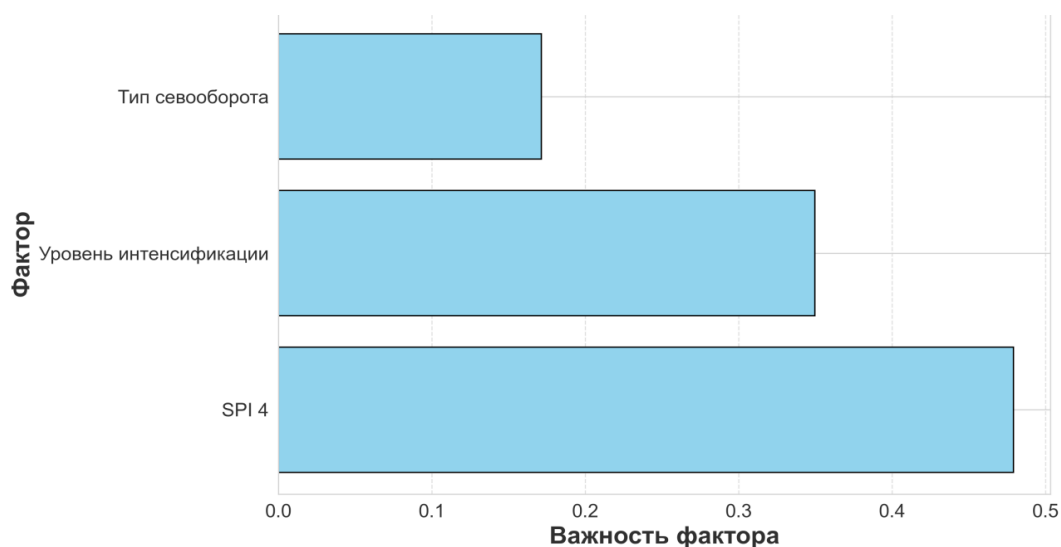


Рис. 3. Результаты анализа важности отдельных признаков с помощью алгоритма RF

Fig. 3. Analysis results showing the importance of individual factors (based on the RF algorithm)

Оценка точности и предиктивной способности моделей осуществлена с помощью основных статистических метрик (табл. 2).

Установлено, что модель XGBoost превзошла другие алгоритмы прогнозирования. Для нее характерны наименьшие значения MAE и RMSE, а также наибольший показатель R^2 , что демонстрирует ее высокую эффективность в прогнозировании продуктивности севооборотов. Значения MAE и RMSE, полученные в моделях CART, RF и Bagging, не имели статистически значимых различий ($H\text{-test} > 0,05$). Значения R^2 для этих моделей находились в диапазоне 0,80...0,85.

На основе анализа значений MAE, RMSE и R^2 модель CART характеризовалась наиболее низкой

способностью к прогнозированию продуктивности севооборотов. В сравнении с высокой эффективностью ансамблевых и нейросетевых методов (Gradient Boosting, XGBoost, ANN) модель CART продемонстрировала относительно высокие значения MAE и RMSE. Это указывает на практическую склонность данного алгоритма к переобучению, а также на ограниченную способность к генерализации результатов в контексте изменчивости данных. Модель искусственной нейронной сети характеризовалась сопоставимыми значениями с ансамблевыми методами по показателям MAE и RMSE, но не достигла ожидаемых показателей прогностической точности, что обусловлено, видимо, ограниченностью объема обучающих данных.

Значения продуктивности севооборотов для различных предиктивных моделей, полученные на основе применения алгоритмов RF, CART и Bagging, имеют наибольшую вариативность и отражают менее стабильное прогнозирование (рис. 4). Модели, построенные с помощью алгоритмов Gradient Boosting,

XGBoost и нейронная сеть ANN, продемонстрировали максимально близкое совпадение значений с линией идеального соответствия, что указывает на их высокую прогностическую способность.

По результатам исследования различных алгоритмов машинного обучения установлено явное

Таблица 2

Результаты оценки точности предиктивных моделей

Table 2

The results of evaluating the accuracy of predictive models

Модель / Model	Метрики оценки точности моделей Metrics for assessing model accuracy		
	MAE	RMSE	R ²
Дерево решений (CART) / Decision Tree (CART)	3,15	3,99	0,80
Случайный лес (RF) / Random Forest (RF)	2,91	3,86	0,81
Бутстрэп-агрегирование (Bagging) / Bootstrap Aggregation (Bagging)	2,70	3,47	0,85
Градиентный бустинг (Gradient Boosting) / Gradient Boosting	1,87	2,43	0,92
Экстремальный градиентный бустинг (XGBoost) / Extreme Gradient Boosting (XGBoost)	1,81	2,34	0,93
Искусственная нейронная сеть (ANN) / Artificial Neural Network (ANN)	1,98	2,88	0,90

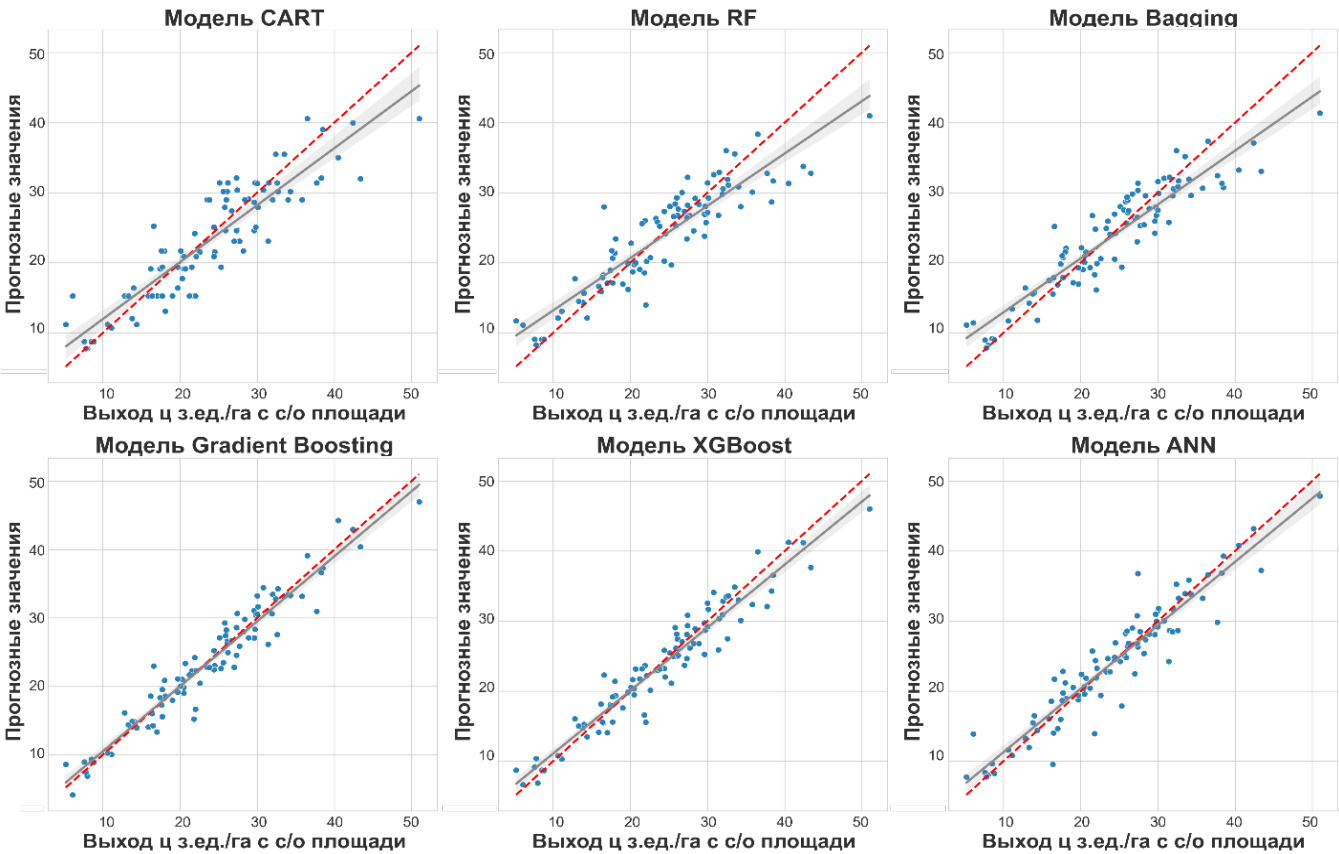


Рис. 4. Диаграммы рассеяния прогнозных и фактических значений продуктивности, полученные с помощью различных алгоритмов машинного обучения:
точки – фактические (ось X) и прогнозные (ось Y) значения продуктивности севооборотов;
диагональная линия ($y = x$) – случаи, когда прогнозные значения в точности совпадают с фактическими;
серая область вокруг линии тренда – 95%-ный доверительный интервал

Fig. 4. Scatter plots of predicted and actual productivity values obtained using various machine learning algorithms:
points – actual (X-axis) and predicted (Y-axis) values of crop rotation productivity; diagonal line on the graph ($y = x$ line) – cases where predicted values exactly match actual values; gray area around the trend line – 95% confidence interval

преимущество ансамблевых (Gradient Boosting, XGBoost) и нейросетевой (ANN) моделей в общей точности прогнозирования продуктивности севооборотов. Преимущество данных моделей отмечалось и в других исследованиях – например, при прогнозировании урожайности кукурузы и ее гибридов [33, 34], а в работе [35] особо подчеркнута эффективность модели регрессии XGBoost с точностью прогноза 93,8%. В наших исследованиях относительно высокие прогностические показатели моделей ANN, Gradient Boosting и XGBoost были достигнуты на основе использования наблюдений многолетних полевых стационарных опытов, однако данные модели обычно классифицируются как «черный ящик», поскольку способы получения прогнозов не являются непосредственно очевидными и им обычно не хватает прозрачности и интерпретируемости [36]. Поэтому для решения проблемы интерпретируемости моделей машинного обучения в последнее время развиваются искусственный интеллект и различные инструменты, а именно интерпретируемое машинное обучение [37].

В мировой науке по исследованию применения машинного обучения (в последнее время – преимущественно глубокого) для прогнозирования различных предметных областей сельского хозяйства осуществляется практика включения широкого комплекса информации о состоянии растительного покрова и свойствах почвы, фенологических наблюдениях, агроклиматических условиях местности и др., что позволяет повысить точность предиктивных моделей до относительно высоких значений [38, 39]. Модели с включением детализированной информации о рабочем участке, культурах и окружающей среде с использованием данных временных рядов полевых опытов также позволяют повысить предсказательную способность алгоритмов машинного обучения. Поэтому многоуровневая параметризация предиктивных моделей, повышение точности предсказаний и их локальная

адаптация требуют большего количества агроэкологических данных о возделываемых культурах и окружающей среде, которые можно получить с помощью различных методов мониторинга на конкретном пространственном объекте [40]. При этом нативный, проксимальный и дистанционный мониторинг становятся безальтернативным подходом в контексте использования методов искусственного интеллекта для формирования цифровых систем поддержки принятия решений в земледелии и масштабирования пространства.

Выводы

В результате реализации 6 моделей машинного обучения для прогнозирования продуктивности севооборотов оценена точность их предиктивной способности. Модели продуктивности севооборотов на основе алгоритмов ANN, Gradient Boosting, XGBoost обладали наиболее высокими прогностическими способностями в зависимости от типа севооборота, атмосферного увлажнения и уровня интенсификации технологии возделывания ($R^2 = 0,90 \dots 0,93$). Высокая эффективность применения ансамблевых и нейросетевых методов объясняется их способностью решать нелинейные задачи взаимодействия, включенные в модели признаков. Модель на основе экстремального градиентного бустинга демонстрирует наилучшие показатели с коэффициентом детерминации (R^2) 0,93, среднеквадратичной ошибкой (RMSE) 2,34 и средней абсолютной ошибкой (MAE) 1,81.

Продолжением исследований могут стать разработка и адаптация гибридных прогнозных моделей продуктивности севооборотов, которые будут базироваться на интеграции многоуровневой параметризации экспертных знаний в земледелии и методов машинного обучения. Мониторинговые исследования агрофитоценозов могут стать безальтернативным решением проблемы нехватки данных в области сельскохозяйственной науки и практики.

Список источников

1. Кирюшин В.И. Управление плодородием почв и продуктивностью агроценозов в адаптивно-ландшафтных системах земледелия // Почвоведение. 2019. № 9. С. 1130-1139. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19070062>
2. Степных Н.В., Нестерова Е.В., Заргарян А.М. и др. Стратегическое значение диверсификации растениеводства // Земледелие. 2022. № 2. С. 7-13. EDN: DNVBGB
3. Лошаков В.Г. Развитие учения о севообороте в РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева // Земледелие. 2017. № 2. С. 3-9. EDN: YLMWMD
4. Завьялова Н.Е., Фомин Д.С., Тетерлев И.С. Влияние севооборотов и бессменных посевов на агрохимические свойства и азотный режим дерново-подзолистой почвы Предуралья // Агрохимия. 2019. № 1. С. 5-10. <https://doi.org/10.1134/S0002188119010162>

References

1. Kiryushin V.I. The management of soil fertility and productivity of agrocenoses in landscape adaptive farming systems. *Pochvovedenie*. 2019;9:1137-1139. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S0032180X19070062>
2. Stepnykh N.V., Nesterova E.V., Zargaryan A.M., Kopylova S.A. Strategic importance of crop production diversification. *Zemledelie*. 2022;2:7-13. (In Russ.)
3. Лошаков В.Г. Development of the doctrine about crop rotation in RSAU-MTAA. *Zemledelie*. 2017;2:3-9. (In Russ.)
4. Zavyalova N.E., Fomin D.S., Teterlev I.S. Effect of crop rotations and monoculture on agrochemical properties and nitrogen regime of sod-podzolic soil of the Cis-Ural region. *Agrokhimiya*. 2019;1:5-10. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S0002188119010162>
5. Kurdyukova O.N. Weed infestation of crops and short rotating crops productivity in the steppe zone.

5. Курдюкова О.Н. Засоренность посевов и продуктивность короткороотационных севооборотов степной зоны // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2022. № 7 (184). С. 69-76. <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2022-7-69-76>
6. Акименко А.С., Свиридов В.И., Дудкина Т.А. и др. Обоснование направления интенсификации производства зерна в севооборотах лесостепи Центрального Черноземья // Земледелие. 2023. № 1. С. 3-7. <https://doi.org/10.24412/0044-3913-2023-1-3-7>
7. Макарова Е.И. Экономико-математическое моделирование оптимизации структуры посевных площадей аграрных предприятий // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2015. № 4-2. С. 174-178. EDN: VNTSYJ
8. Нуретдинов И.Г., Нуретдинова Ю.В., Хасянов О.Р. Оптимизация структуры посевных площадей сельскохозяйственных культур методом экономико-математического моделирования: практический аспект // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2015. Т. 10, № 4. С. 24-27. EDN: VLQMFT
9. Свиридов В.И. Методологические и методические аспекты проектирования оптимальной структуры посевных площадей в условиях перехода к адаптивно-ландшафтному земледелию // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2018. № 2. С. 4-10. EDN: YVOILT
10. Никитина К.Р. Оптимизация структуры севооборота с применением метода квадратичного программирования // Экономика. Управление. Инновации. 2019. № 2 (6). С. 92-96. EDN: KMMBUK
11. Апажев А.К., Шекихачев Ю.А. Оптимизация функционирования сельскохозяйственных производственных систем // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В.М. Кокова. 2022. № 1 (35). С. 81-89. <https://doi.org/10.55196/2411-3492-2022-1-35-81-89>
12. Дудко Ю.В., Маринкин Е.Б., Владимирова Т.М. Применение нейросетевых технологий в предсказании плодородия почв с зернобобовыми культурами и прогнозировании их урожайности // Вопросы науки: инноватика, техника и технологии. 2019. № 1. С. 67-72. EDN: YXPXCX
13. Рогачев А.Ф. Системный анализ и прогнозирование временных рядов урожайности на основе автокорреляционных функций и нейросетевых технологий // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2018. № 3 (51). С. 309-316. EDN: VOQSWI
14. Рогачев А.Ф., Мелихова Е.В. Обоснование алгоритмов и инструментария для нейросетевого прогнозирования урожайности агрокультур с использованием ретроспективных данных // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2020. № 1 (57). С. 290-302. <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2020-01-29>
15. Лебедь Н.И., Токарев К.Е., Нехорошев Д.Д. и др. Разработка методов управления продукционными процессами фитоагроценозов в условиях точного земледелия с использованием гибридных автоматизированных систем и алгоритмов искусственного интеллекта // Международный сельскохозяйственный журнал. 2024. № 2. С. 201-204. EDN: WMQCNC
16. Benos L., Tagarakis A.C., Dolias G. et al. Machine learning in agriculture: A comprehensive updated review. *Sensors*. 2021;21(11):3758. <https://doi.org/10.3390/s21113758>
17. Attri I., Awasthi L.K., Sharma T.P. Machine learning in agriculture: a review of crop management applications. *Multimedia Tools and Applications*. 2024;83(5):12875-12915. <https://doi.org/10.1007/s11042-023-16105-2>
18. Taye M.M. Understanding of Machine Learning with Deep Learning: Architectures, Workflow, Applications and Future Directions. *Computers*. 2023;12(5):91. <https://doi.org/10.3390/computers12050091>
19. Kalichkin V.K., Alsova O.K., Maksimovich K.Y. Application of the decision tree method for predicting the yield of spring wheat. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing. 2021;839(3):032042. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/839/3/032042>
20. Elavarasan D., Vincent P.M. D.R. A reinforced random forest model for enhanced crop yield prediction by integrating agrarian *Bulletin of KSAU*. 2022;7:184:69-76. (In Russ.). <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2022-7-69-76>
6. Akimenko A.S., Sviridov V.I., Dudkina T.A., Vavin V.G., Dolgoplova N.V. Substantiation of the direction of grain production intensification in crop rotations of the forest-steppe of the Central Chernozem region. *Zemledelie*. 2023;1:3-7. <https://doi.org/10.24412/0044-3913-2023-1-3-7>
7. Makarova E.I. Economic and mathematical modeling of structural optimization of cropping system of agricultural enterprises. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2015;4-2:174-178. (In Russ.).
8. Nuretdinov I.G., Nuretdinova Yu.V., Khasyanov O.R. Optimization of sown area structure of crops by economic and mathematical modeling: practical aspect. *Vestnik of the Kazan State Agrarian University*. 2015;10(4):24-27. (In Russ.).
9. Sviridov V.I. Methodological and methodological aspects of designing the optimal structure of acreage in the transition to adaptive landscape farming. *Vestnik Kurskoy Gosudarstvennoy Selskhozayaystvennoy Akademii*. 2018;2:4-10. (In Russ.).
10. Nikitina K.R. Crop rotation optimization using the quadratic programming approach. *Ekonomics. Management. Innovations*. 2019;2:92-96. (In Russ.).
11. Apazhev A.K., Shekikhachev Yu.A. Optimization of the functioning of agricultural production systems. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta im. V.M. Kokova = Izvestiya of the Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov*. 2022;1:81-89. <https://doi.org/10.55196/2411-3492-2022-1-35-81-89> (In Russ.).
12. Dudko Yu.V., Marinkin E.B., Vladimirova T.M. Use of neural network technologies in predicting soil fertility when growing leguminous crops and predicting their yield. *Voprosy Nauki: Innovatika, Tekhnika i Tekhnologii*. 2019;1:67-72. (In Russ.).
13. Rogachev A.F. System analysis and forecasting of yield time series based on autocorrelation functions and neural network technologies. *Proceedings of Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Education*. 2018;3:309-316. (In Russ.).
14. Rogachev A.F., Melikhova, E.V. Justification of algorithms and tools for neural network forecasting of agricultural productivity using retrospective data. *Proc. of the Lower Volga AgroUniversity Comp*. 2020;1:290-302. (In Russ.). <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2020-01-29>
15. Lebed N.I., Tokarev K.E., Nekhoroshev D.D., Storozhakov S.Yu., Popov A.Yu. Development of methods for managing the production processes of phyto-agrocenoses in precision farming using hybrid automated systems and artificial intelligence algorithms. *Mezhdunarodnyi Sel'skhozayaystvennyi Zhurnal*. 2024;2:201-204. (In Russ.).
16. Benos L., Tagarakis A.C., Dolias G. et al. Machine learning in agriculture: A comprehensive updated review. *Sensors*. 2021;21(11):3758. <https://doi.org/10.3390/s21113758>
17. Attri I., Awasthi L.K., Sharma T.P. Machine learning in agriculture: a review of crop management applications. *Multimedia Tools and Applications*. 2024;83(5):12875-12915. <https://doi.org/10.1007/s11042-023-16105-2>
18. Taye M.M. Understanding of Machine Learning with Deep Learning: Architectures, Workflow, Applications and Future Directions. *Computers*. 2023;12(5):91. <https://doi.org/10.3390/computers12050091>
19. Kalichkin V.K., Alsova O.K., Maksimovich K.Y. Application of the decision tree method for predicting the yield of spring wheat. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing. 2021;839(3):032042. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/839/3/032042>
20. Elavarasan D., Vincent P.M. D.R. A reinforced random forest model for enhanced crop yield prediction by integrating agrarian

19. Kalichkin V.K., Alsova O.K., Maksimovich K.Y. Application of the decision tree method for predicting the yield of spring wheat. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing. 2021;839(3):032042. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/839/3/032042>
20. Elavarasan D., Vincent P.M. D.R. A reinforced random forest model for enhanced crop yield prediction by integrating agrarian parameters. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. 2021;12:10009-10022. <https://doi.org/10.1007/s12652-020-02752-y>
21. Kok Z.H., Shariff A.R.M., Alfatni M.S.M., Khairunni-za-Bejo S. Support vector machine in precision agriculture: a review. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021;191:106546. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106546>
22. Hegedus P.B., Maxwell B.D., Mieno T. Assessing performance of empirical models for forecasting crop responses to variable fertilizer rates using on-farm precision experimentation. *Precision Agriculture*. 2023;24:677-704. <https://doi.org/10.1007/s11119-022-09968-2>
23. Gopal M.P.S., Bhargavi R. Performance evaluation of best feature subsets for crop yield prediction using machine learning algorithms. *Applied Artificial Intelligence*. 2019;33(7):621-642. <https://doi.org/10.1080/08839514.2019.1592343>
24. Han J., Zhang Z., Cao J. et al. Prediction of winter wheat yield based on multi-source data and machine learning in China. *Remote Sensing*. 2020;12(2):236. <https://doi.org/10.3390/rs12020236>
25. Tigkas D., Vangelis H., Tsakiris G. DrinC: a software for drought analysis based on drought indices. *Earth Science Informatics*. 2015;8:697-709. <https://doi.org/10.1007/s12145-014-0178-y>
26. Breiman L., Friedman J., Olshen R.A., Stone C.J. Classification and Regression Trees (1st ed.). Chapman and Hall/CRC. 1984;368. <https://doi.org/10.1201/9781315139470>
27. Breiman L. Random forests. *Machine learning*. 2001;45:5-32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
28. Breiman L. Bagging predictors. *Machine learning*. 1996;24:123-140. <https://doi.org/10.1007/BF00058655>
29. Friedman J.H. Greedy function approximation: a gradient boosting machine. *The Annals of Statistics*. 2001;29(5):1189-1232. <https://doi.org/10.1214/aos/1013203451>
30. Haykin S. Neural networks: A comprehensive foundation. Prentice Hall PTR. Upper Saddle River, NJ. United States. 1994;768.
31. Каличкин В.К., Федоров Д.С., Альсова О.К., Максимович К.Ю. Разработка программы анализа и прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур // Достижения науки и техники АПК. 2022. Т. 36, № 1. С. 51-56. https://doi.org/10.53859/02352451_2022_36_1_51
32. Программа анализа и прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ (CYAF – Crop Yield Analysis & Forecast) № 2021777894 / Д.С. Федоров, О.К. Альсова, В.К. Каличкин, К.Ю. Максимович; 08.11.2021.
33. Du Z., Yang L., Zhang D. et al. Corn variable-rate seeding decision based on gradient boosting decision tree model. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2022;198:107025. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107025>
34. Sarijaloo F.B., Porta M., Taslimi B., Pardalos P.M. Yield performance estimation of corn hybrids using machine learning algorithms. *Artificial Intelligence in Agriculture*. 2021;5:82-89. <https://doi.org/10.1016/j.aiia.2021.05.001>
35. Awasthi P., Mishra S., Gupta N. Performance Assessment of Machine Learning Techniques for Corn Yield Prediction. *International Conference on Advanced Network Technologies and Intelligent Computing*. Cham: Springer Nature Switzerland. 2022;320-335. https://doi.org/10.1007/978-3-031-28183-9_23
36. Wolanin A., Mateo-García G., Camps-Valls G. et al. Estimating and understanding crop yields with explainable deep learning in the Indian Wheat Belt. *Environmental Research Letters*. 2020;15(2):024019. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab68ac>
37. Hassija V., Chamola V., Mahapatra A. et al. Interpreting black-box models: a review on explainable artificial intelligence. *Cognitive Computation*. 2023;16:45-74. <https://doi.org/10.1007/s12559-023-10179-8>
38. Wang X., Huang J., Feng Q., Yin D. Winter wheat yield prediction at county level and uncertainty analysis parameters. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. 2021;12:10009-10022. <https://doi.org/10.1007/s12652-020-02752-y>
39. Kok Z.H., Shariff A.R.M., Alfatni M.S.M., Khairunni-za-Bejo S. Support vector machine in precision agriculture: a review. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021;191:106546. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106546>
40. Hegedus P.B., Maxwell B.D., Mieno T. Assessing performance of empirical models for forecasting crop responses to variable fertilizer rates using on-farm precision experimentation. *Precision Agriculture*. 2023;24:677-704. <https://doi.org/10.1007/s11119-022-09968-2>
41. Gopal M.P.S., Bhargavi R. Performance evaluation of best feature subsets for crop yield prediction using machine learning algorithms. *Applied Artificial Intelligence*. 2019;33(7):621-642. <https://doi.org/10.1080/08839514.2019.1592343>
42. Han J., Zhang Z., Cao J. et al. Prediction of winter wheat yield based on multi-source data and machine learning in China. *Remote Sensing*. 2020;12(2):236. <https://doi.org/10.3390/rs12020236>
43. Tigkas D., Vangelis H., Tsakiris G. DrinC: a software for drought analysis based on drought indices. *Earth Science Informatics*. 2015;8:697-709. <https://doi.org/10.1007/s12145-014-0178-y>
44. Breiman L., Friedman J., Olshen R.A., Stone C.J. Classification and Regression Trees (1st ed.). Chapman and Hall/CRC. 1984;368. <https://doi.org/10.1201/9781315139470>
45. Breiman L. Random forests. *Machine learning*. 2001;45:5-32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
46. Breiman L. Bagging predictors. *Machine learning*. 1996;24:123-140. <https://doi.org/10.1007/BF00058655>
47. Friedman J.H. Greedy function approximation: a gradient boosting machine. *The Annals of Statistics*. 2001;29(5):1189-1232. <https://doi.org/10.1214/aos/1013203451>
48. Haykin S. Neural networks: A comprehensive foundation. Prentice Hall PTR. Upper Saddle River, NJ. United States. 1994;768.
49. Каличкин В.К., Федоров Д.С., Альсова О.К., Максимович К.Ю. Development of software for analyzing and forecasting crop yields. *Achievements of Science and Technology in Agro-Industrial Complex*. 2022;36(1):51-56. (In Russ.). https://doi.org/10.53859/02352451_2022_36_1_51
50. Crop Yield Analysis & Forecast (CYAF) software. Fedorov D.S., Alsova O.K., Kalichkin V.K., Maksimovich K.Yu. Certificate of state registration of software No. 2021777894, 08.11.2021. (In Russ.).
51. Du Z., Yang L., Zhang D. et al. Corn variable-rate seeding decision based on gradient boosting decision tree model. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2022;198:107025. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107025>
52. Sarijaloo F.B., Porta M., Taslimi B., Pardalos P.M. Yield performance estimation of corn hybrids using machine learning algorithms. *Artificial Intelligence in Agriculture*. 2021;5:82-89. <https://doi.org/10.1016/j.aiia.2021.05.001>
53. Awasthi P., Mishra S., Gupta N. Performance Assessment of Machine Learning Techniques for Corn Yield Prediction. *International Conference on Advanced Network Technologies and Intelligent Computing*. Cham: Springer Nature Switzerland. 2022;320-335. https://doi.org/10.1007/978-3-031-28183-9_23
54. Wolanin A., Mateo-García G., Camps-Valls G. et al. Estimating and understanding crop yields with explainable deep learning in the Indian Wheat Belt. *Environmental Research Letters*. 2020;15(2):024019. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab68ac>
55. Hassija V., Chamola V., Mahapatra A. et al. Interpreting black-box models: a review on explainable artificial intelligence. *Cognitive Computation*. 2023;16:45-74. <https://doi.org/10.1007/s12559-023-10179-8>
56. Wang X., Huang J., Feng Q., Yin D. Winter wheat yield prediction at county level and uncertainty analysis

36. Wolanin A., Mateo-García G., Camps-Valls G. et al. Estimating and understanding crop yields with explainable deep learning in the Indian Wheat Belt. *Environmental Research Letters*. 2020;15(2):024019. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab68ac>

37. Hassija V., Chamola V., Mahapatra A. et al. Interpreting Black-Box Models: A Review on Explainable Artificial Intelligence. *Cognitive Computation*. 2023;16:45-74. <https://doi.org/10.1007/s12559-023-10179-8>

38. Wang X., Huang J., Feng Q., Yin D. Winter wheat yield prediction at county level and uncertainty analysis in main wheat-producing regions of China with deep learning approaches. *Remote Sensing*. 2020;12(11):1744. <https://doi.org/10.3390/rs12111744>

39. Reichstein M., Camps-Valls G., Stevens B. et al. Deep learning and process understanding for data-driven Earth system science. *Nature*. 2019;566:195-204. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-0912-1>

40. Каличкин В.К., Максимович К.Ю. Методология формирования цифровой системы управления земледелием // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2024. Т. 54, № 3. С. 5-20. EDN: OJMVRJ

Информация об авторах

¹ **Каличкин Владимир Климентьевич**, д-р с.-х. наук, руководитель научного направления по земледелию и агрохимии СФНЦА РАН; SPIN-код: 1587-4615, AuthorID: 247907; vk.kalichkin@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-7765-3451>

² **Федоров Дмитрий Сергеевич**, младший научный сотрудник лаборатории агроклиматических исследований СФНЦА РАН; SPIN-код: 9530-8327, AuthorID: 1133884; dima.fedorov99@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8678-400X>

³ **Максимович Кирилл Юрьевич**, канд. биол. наук, научный сотрудник лаборатории агроклиматических исследований СФНЦА РАН; SPIN-код: 4700-3900, AuthorID: 1025027; kiri-maksimovi@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9563-4641>

⁴ **Риксен Вера Сергеевна**, заведующий лабораторией агроклиматических исследований СФНЦА РАН; SPIN-код: 7858-1352, AuthorID: 1068243; riclog@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9898-4754>

^{1,2,3,4} Сибирский федеральный научный центр агроботехнологий Российской академии наук; 630501, Российская Федерация, Новосибирская область, р.п. Краснообск, ул. Центральная, 2б

Вклад авторов

В.К. Каличкин – концептуализация, методология, администрирование проекта, проведение исследования, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование; Д.С. Федоров – программное обеспечение, верификация данных, формальный анализ, проведение исследования, визуализация; К.Ю. Максимович – концептуализация, формальный анализ, проведение исследования, администрирование проекта, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;

В.С. Риксен – методология, верификация данных, администрирование данных, формальный анализ, проведение исследования.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат.

Статья поступила 18.08.2024, после рецензирования и доработки 07.10.2024; принята к публикации 06.12.2024

in main wheat-producing regions of China with deep learning approaches. *Remote Sensing*. 2020;12(11):1744. <https://doi.org/10.3390/rs12111744>

39. Reichstein M., Camps-Valls G., Stevens B. et al. Deep learning and process understanding for data-driven Earth system science. *Nature*. 2019;566:195-204. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-0912-1>

40. Kalichkin V.K., Maksimovich K.Yu. Methodology for forming a digital farming management system. *Siberian Herald of Agricultural Science*. 2024;54(3):5-20. (In Russ.)

Author Information

¹ **Vladimir K. Kalichkin**, DSc (Ag), Head of Agriculture and Agrochemistry Research Area, SFSCA RAS; vk.kalichkin@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-7765-3451>.

² **Dmitry S. Fedorov**, Junior Researcher, Agro-Climatic Research Laboratory, SFSCA RAS; dima.fedorov99@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8678-400X>.

³ **Kirill Yu. Maksimovich**, PhD (Biology), Research Associate, Agro-Climatic Research Laboratory, SFSCA RAS; kiri-maksimovi@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9563-4641>.

⁴ **Vera S. Riksen**, Head of Agro-Climatic Research Laboratory, SFSCA RAS; riclog@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9898-4754>.

^{1,2,3,4} Siberian Federal Scientific Center of Agrobiotechnologies at the Russian Academy of Sciences; 630501, Tsentralnaya Str., 2b, Krasnoobsk, Novosibirsk Oblast, Russia

Author Contributions

V.K. Kalichkin – conceptualization, methodology, project administration, conducting research, writing – review and editing of the manuscript;

D.S. Fedorov – software, data verification, formal analysis, investigation, visualization;

K.Yu. Maksimovich – conceptualization, formal analysis, investigation, project administration, writing – review and editing of the manuscript;

V.S. Riksen – methodology, data verification, data administration, formal analysis, investigation.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism.

Received 18.08.2024; Revised 07.10.2024; Accepted 06.12.2024

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.372

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-53-58>

Оценка функциональных характеристик тракторов тягового класса 4,0

И.В. Грибов¹, А.С. Зенин², А.В. Коломейченко³, М.В. Шипов⁴, С.Б. Карякин⁵, Н.В. Перевозчикова⁶^{1, 2, 3, 4, 5} Центральный орден Трудового Красного Знамени научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт «НАМИ»; г. Москва, Россия⁶ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия¹ ivan.gribov@nami.ru² artem.zenin@nami.ru³ a.kolomeychenko@nami.ru⁴ maxim.shipov@nami.ru⁵ sergey.karyakin@nami.ru⁶ n.perevozchikova@rgau-msha.ru

Аннотация. Оптимальный выбор приобретаемой техники на основе ее функциональных характеристик является важной задачей для современных сельскохозяйственных предприятий. С целью выбора оптимальной модели трактора сравнили стоимость и виды выполняемых работ трех тракторов тягового класса 4,0: Кировец К-5, БТЗ 254-К и DEUTZ-FAHR6230 TTV. Для проведения экспертизы по определению отличий применена методика сравнения моделей тракторов, учитывающая показатели технологической универсальности, агротехнических свойств, потенциальной производительности и стоимости выполнения технологических операций, и рассчитан показатель технологического уровня тракторов. Результаты проведенной оценки показали применимость всех моделей на пахотных, уборочных работах и с навесными комбинированными машинами и невозможность их применения на междурядной обработке. В сравнении с отечественными аналогами DEUTZ-FAHR6230 TTV может развивать большую скорость и достигать большей производительности. Однако технологический уровень тракторов Кировец К-5 и БТЗ 254-К имеет одинаковое значение 0,72 и превосходит импортный аналог DEUTZ-FAHR6230 TTV, имеющий показатель 0,69. Учитывая функциональные характеристики и стоимость тракторов, предприятиям выгодно приобретать отечественную технику.

Ключевые слова: функциональные характеристики, технологический уровень, показатель универсальности, показатель агротехнических свойств, показатель потенциальной производительности, показатель стоимости технологического процесса

Для цитирования: Грибов И.В., Зенин А.С., Коломейченко А.В., Шипов М.В., Карякин С.Б., Перевозчикова Н.В. Оценка функциональных характеристик тракторов тягового класса 4,0 // Агроинженерия. 2025. Т. 27. № 1. С. 53-58. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-53-58>

ORIGINAL ARTICLE

Functional evaluation of tractors of traction class 4.0

I. V. Gribov¹, A. S. Zenin², A. V. Kolomeychenko³, M. V. Shipov⁴, S. B. Karyakin⁵, N. V. Perevozchikova⁶^{1, 2, 3, 4, 5} Central Scientific Research Automobile and Automotive Engines Institute – FSUE “NAMI”; Moscow, Russia⁶ Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia¹ ivan.gribov@nami.ru² artem.zenin@nami.ru³ a.kolomeychenko@nami.ru⁴ maxim.shipov@nami.ru⁵ sergey.karyakin@nami.ru⁶ n.perevozchikova@rgau-msha.ru

Abstract. The optimal choice of purchased equipment based on its functional characteristics is an important task for modern agricultural enterprises. In order to select the optimal tractor model, the cost and types of work performed were compared with three tractors of traction class 4.0: Kirovets K-5, BTZ 254-K, and DEUTZ-FAHR6230 TTV. To determine the differences through the examination, the authors used a methodology of comparing tractor models, taking into account indicators of technological versatility, agrotechnical properties, potential (expected) productivity

and cost of performing technological operations. They also determined an indicator of the technological level of tractors. The assessment results showed the applicability of all models for plowing and harvesting operations, as well as for working with mounted combined machines. However, the models were considered unsuitable for inter-row cultivation. As compared with domestic counterparts, the DEUTZ-FAHR6230 TTV can reach higher speeds and higher performance. However, the technological level of Kirovets K-5 and BTZ 254-K tractors has the same value of 0.72 and surpasses the imported analog DEUTZ-FAHR6230 TTV, which has an indicator of 0.69. Taking into account the functional characteristics and cost of tractors, it is profitable for enterprises to purchase domestic equipment.

Keywords: functional characteristics, technological level, indicator of universality, indicator of agrotechnical properties, indicator of potential (expected) productivity, indicator of technological process cost

For citation: Gribov I.V., Zenin A.S., Kolomeychenko A.V., Shipov M.V., Karyakin S.B., Perevozchikova N.V. Functional evaluation of tractors of traction class 4.0. *Agricultural Engineering (Moscow)*. (In Russ.). 2025;27(1):53-58 <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-53-58>

Введение

Одной из главных задач современных предприятий является оптимальный выбор техники для машинно-тракторного парка на основе ее функциональных характеристик [1-4]. Анализ и оценка функциональных характеристик заложены в экспертизе по определению отличий в параметрах между зарубежной техникой и продукцией, произведенной на территории Российской Федерации, в рамках постановления Правительства Российской Федерации¹ от 20 сентября 2017 г. № 1135. Значения функциональных характеристик позволяют сделать выводы о наличии или отсутствии аналога техники/продукции, производимой на территории Российской Федерации. При этом функциональные характеристики рассматриваемой техники (продукции) в механизме проведения экспертизы отражают технологические и технические возможности аналогичных машин, имеющих схожие параметры выполнения одних и тех же функций, то есть могут быть коммерчески взаимозаменяемыми. Данный механизм проведения экспертизы разработан для поддержки развития АПК страны и является эффективным инструментом по регулированию рынка техники, реализуемой на территории Российской Федерации. Для проведения экспертизы по определению отличий можно применить методику сравнения различных моделей тракторов, учитывающую основные показатели и технические характеристики энергетического средства, разработанную на кафедре «Тракторы и автомобили» РГАУ-МСХА².

¹ Об отнесении продукции к промышленной продукции, не имеющей произведенных в Российской Федерации аналогов, и внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации: постановление Правительства Российской Федерации от 20 сентября 2017 г. № 1135 // Официальный интернет-портал правовой информации. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201709250017> (дата обращения: 20.01.2024).

² Кутков Г.М. Тракторы и автомобили. Теория и технологические свойства: Учебник. М.: Инфа-М, 2014. 506 с.

Цель исследований: сравнить функциональные характеристики тракторов тягового класса 4,0 с учетом их стоимости и вида выполняемых работ.

Материалы и методы

Показатель технологического уровня (Π_T) трактора (энергетического средства) можно представить в виде функциональной зависимости:

$$\Pi_T = f(Y_T, A_T, W_T, C_T),$$

где Y_T , A_T , W_T , C_T – безразмерный обобщенный показатель технологической универсальности, агротехнических свойств, потенциальной производительности и стоимости выполнения технологических операций соответственно³.

Для расчета показателя технологического уровня сравниваемых тракторов применены основные технические характеристики, приведенные в таблице 1.

Показатель Y_T свидетельствует о способности трактора (энергетического средства) выполнять с установленным качеством основные сельскохозяйственные операции: работать с навесными комбинированными машинами (a_a), на пахотных операциях (a_n), на уборке ($a_{уб}$) и в ходе транспортных процессов ($a_{тр}$). Данный показатель определяется по формуле:

$$Y_T = \frac{(a_a + a_n + a_{уб} + a_{тр})}{4}. \quad (1)$$

Способность трактора выполнять транспортные работы применяется для оценки функциональных характеристик с заделом на будущие изменения норм и правил эксплуатации сельскохозяйственной техники и оценивается показателем ($a_{тр}$). В настоящее время транспортная скорость по внутрихозяйственным дорогам ограничена 30 км/ч (СНиП 2.05.1183 «Внутрихозяйственные автомобильные дороги в колхозах, совхозах и других сельскохозяйственных предприятиях и организациях»).

³ Там же.

Таблица 1

Технические характеристики тракторов тягового класса 4,0

Table 1

Technical characteristics of tractors of traction class 4

Название / Title	Кировец К-5	БТЗ 254-К	DEUTZ-FAHR6230 TTV
Компоновочная схема / Layout diagram	4К4	4К4	4К4
Размерность колес (перед/зад) / Wheel dimension (front/rear)	23,1R26	23,1R26	540/65 R28-650/65 R38
Грузоподъемность передней навески / Load capacity of the front hitch	0	0	5450
Грузоподъемность задней навески / Load capacity of the rear hitch	6500	5000	8400
Наличие переднего ВОМ / Presence of the front PTO	-	-	+
Мощность двигателя, кВт / Engine power, kW	184	184	170
Масса трактора, кг / Tractor weight, kg	10500	8660	8400
Масса балласта, кг / Ballast weight, kg	680	0	1000
Транспортная скорость, км/ч / Transport speed, km/h	30	30	40
Агротехнический просвет, мм / Agrotechnical clearance, mm	470	400	510
Радиус поворота, м / Turning radius, m	6,5	6,7	10
Удельный расход топлива, кг/кВт·ч / Specific fuel consumption, kg/kWh	229	238	234
Стоимость трактора, тыс. руб. / Cost of the tractor, rub	8750	7200	30466

Показатель агротехнических свойств (A_t) характеризует качество выполнения работ согласно агротехническим требованиям учитывает давление на почву (γ_q), площадь уплотненного участка движителем ($\gamma_{ин}$), агротехнический просвет (γ_h), маневренность трактора (γ_m) и определяется зависимостью:

$$A_t = f(\gamma_q, \gamma_{ин}, \gamma_h, \gamma_m). \quad (2)$$

Значения коэффициентов весомости единичных показателей определяются методом опроса экспертов по специально разработанной методике⁴.

Потенциальная производительность машинно-тракторного агрегата (МТА) – это производительность с орудием такой ширины захвата, при которой его тяговое сопротивление равно номинальному тяговому усилию трактора, а скорость движения МТА является максимальной при данной мощности двигателя, но не превышает скорость, установленную агротехническими требованиями.

Показатель потенциальной производительности ($W_{п}$) определяется по формуле:

$$W_{п} = B_{зах} \cdot V_{тр}, \quad (3)$$

где $B_{зах}$ – ширина захвата МТА при максимальном тяговом усилии, м; $V_{тр}$ – скорость МТА, м/сек.

$$B_{зах} = \frac{P_{кр.ном}}{k_{оп}}, \quad (4)$$

где $P_{кр.ном}$ – номинальное тяговое усилие, кН; $k_{оп}$ – коэффициент сопротивления орудия.

⁴ Кутыков Г.М., Кузьмичев В.В., Перевозчикова Н.В. Разработка исходных требований на сельскохозяйственный трактор и оценка его технологического уровня. М.: МГАУ, 2011. 36 с.

$$V_{тр} = \frac{N_{кр}}{P_{кр.ном}}, \quad (5)$$

где $N_{кр}$ – мощность трактора на крюке.

Для расчета мощности на крюке используется показатель тягового КПД, коэффициента возможного использования мощности двигателя, коэффициент снижения мощности трактора вследствие динамической нагрузки и номинальной мощности двигателя.

Показатель потенциальной сменной производительности трактора (W_t) определяется по выражению:

$$W_t = \frac{W_{п.тр}}{W_{п.макс}}. \quad (6)$$

Показатель стоимости выполнения технологического процесса определяется относительным показателем стоимости (C_t):

$$C_t = \frac{C_{п.мин}}{C_{п}}, \quad (7)$$

где $C_{п.мин}$ – минимальные приведенные затраты из сравниваемых тракторов (табл. 4), руб/га; $C_{п}$ – приведенные затраты оцениваемого трактора, руб/га.

Приведенные затраты определяются по формуле:

$$C_{п} = C_3 + E_n \cdot K_y, \quad (8)$$

где C_3 – прямые эксплуатационные затраты, руб/га; E_n – норматив коэффициента капитальных вложений; K_y – удельные капитальные вложения, руб/га.

Оценка прямых эксплуатационных затрат определяется по ГОСТ 34393-2018 «Техника сельскохозяйственная. Методы экономической оценки». Данный показатель учитывает затраты на топливо, денежные средства

на оплату труда тракториста, а также стоимость ремонта и технического обслуживания техники.

Технологический уровень (Π_T) сравниваемых тракторов (энергетических средств) определяется по формуле:

$$\Pi_T = S_{YT} \cdot Y_T + S_{AT} \cdot A_T + S_{WT} \cdot W_T + S_{CT} \cdot C_T \quad (9)$$

В связи с тем, что показатели не связаны между собой никакой функциональной зависимостью, коэффициенты весомости S_{YT} , S_{AT} , S_{WT} , S_{CT} определяются методом ранжирования при помощи экспертов.

Результаты и их обсуждение

Анализ рассчитанного показателя технологической универсальности (табл. 2) показал, что все тракторы могут работать с навесными комбинированными машинами, но наиболее универсальным является импортный образец. DEUTZ-FAHR6230 TTV имеет передний вал отбора мощности (ВОМ) и способен использовать на передней навеске активные сельскохозяйственные машины. При выполнении пахотных и уборочных работ все тракторы находятся примерно на одном техническом уровне и имеют одинаковую эффективность применения. К уборочным процессам относятся работы по кошению травы широкозахватными косилками. На междурядной обработке применение тракторов общего назначения невозможно в связи с отсутствием регулировки колеи и использования шин с широким профилем. Трактор DEUTZ-FAHR6230 TTV в сравнении с отечественными аналогами способен развивать большую транспортную скорость, что сказывается на производительности машинно-тракторного агрегата на транспортных работах.

Анализ показателей агротехнических свойств сравниваемых тракторов показал, что наименьшее давление на почву, определяемое по ГОСТ 26953-86⁵, оказывает БТЗ 254-К (табл. 3). Площадь уплотненного участка движителем в зависимости от размерности применяемых шин определялась расчетным путем. Наилучший показатель агротехнического просвета имеет трактор DEUTZ-FAHR6230 TTV, однако для тракторов общего назначения он оказывает меньшее влияние на качество выполнения работ. Для данного типа работ следует применять наиболее подходящие универсально-пропашные трактора тяговых классов 0,9-2,0 [8-10]. По показателям вписываемости и маневренности лидирующую позицию среди сравниваемых тракторов занимает Кировец К-5. Благодаря конструкции рамы, имеющей шарнирно-сочлененный тип, у которого наименьший радиус поворота. Трактор БТЗ 254-К с рамой той же конструкции также имеет высокий показатель маневренности.

Результаты расчета показателей потенциальной производительности (W_{Π}) и относительного показателя потенциальной сменной производительности (W_T) представлены на рисунке.

Расчетный показатель технологического уровня тракторов приведен в таблице 4.

По относительному показателю стоимости выполнения технологического процесса отечественные тракторы более чем в два раза превосходят иностранный аналог тягового класса 4,0, что связано с высокой стоимостью приобретения DEUTZ-FAHR6230 TTV в связи со сложностями поставки импортной техники на территорию Российской Федерации и снижением обменного курса российского рубля.

Показатель технологической универсальности (Y_T) тракторов тягового класса 4,0

Таблица 2

Indicator of technological versatility of tractors of traction class 4.0

Table 2

Модель трактора / Model of tractor	α_a	α_{Π}	α_{yb}	α_{tr}	Y_T
Кировец К-5	0,49	0,75	0,47	0,5	0,55
БТЗ 254-К	0,48	0,81	0,47	0,5	0,57
DEUTZ-FAHR6230 TTV	0,86	0,78	0,46	0,67	0,69

Таблица 3

Показатель агротехнических свойств (A_T) тракторов тягового класса 4,0

Table 3

Indicator of agrotechnical characteristics of tractors of traction class 4.0

Модель трактора / Model of tractor	γ_g	γ_h	γ_m	γ_{Π}	A_T
Кировец К-5	0,51	0,67	1	1	0,69
БТЗ 254-К	0,61	0,57	0,97	1	0,7
DEUTZ-FAHR6230 TTV	0,58	0,73	0,65	0,9	0,68

⁵ ГОСТ 26953-86 «Техника сельскохозяйственная мобильная. Методы определения воздействия движителей на почву». М.: Издательство стандартов, 1986. 11 с.

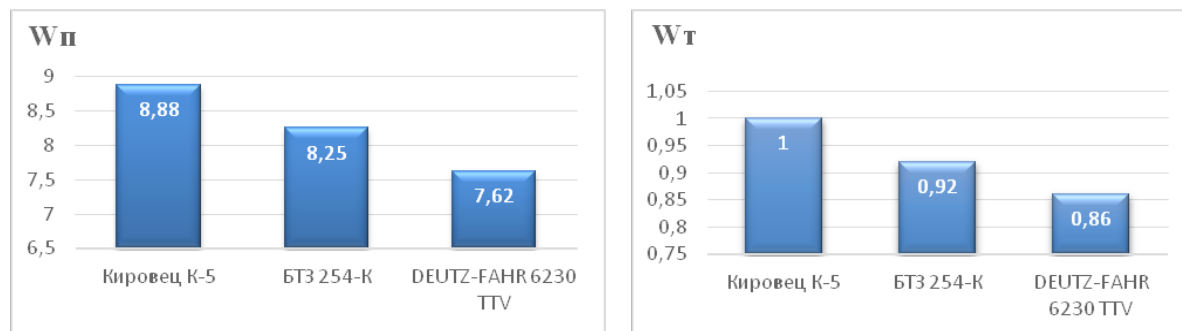


Рис. Потенциальная производительность (W_p , га/ч) и относительный показатель потенциальной сменной производительности (W_t) тракторов тягового класса 4,0

Fig. Performance indicators of tractors of traction class 4.0

Показатели приведенных затрат, стоимости и технологического уровня тракторов тягового класса 4,0

Таблица 4

Indicator of reduced costs, cost indicators and technological level of tractors of traction class 4.0

Table 4

Модель трактора <i>Model of tractor</i>	Удельные капитальные вложения, K_p , руб/га <i>Specific capital investments, K_p, rub./ha</i>	Прямые эксплуатационные затраты, C_z , руб/га <i>Direct operating costs, C_z, rub./ha</i>	Приведенные затраты, C_p , руб/га <i>Presented costs, C_p, rub./ha</i>	Относительный показатель стоимости выполнения технологического процесса, C_p , руб/га <i>Relative indicator of the cost of technological process implementation, S_p, rub./ha</i>	Технологический уровень трактора, Π_t <i>Tractor technological level, Π_t</i>
Кировец К-5	1356	1546	1682	0,95	0,72
БТЗ 254-К	1200	1484	1604	1	0,72
DEUTZ-FAHR6230 TTV	5494	3289	3838	0,42	0,69

По показателю технологического уровня тракторы Кировец К-5 и БТЗ 254-К равны между собой и имеют преимущество перед зарубежной моделью DEUTZ-FAHR6230 TTV.

Выводы

1. На пахотных и уборочных работах тракторы тягового класса 4,0 Кировец К-5, БТЗ 254-К, DEUTZ-FAHR6230 TTV находятся примерно на одном технологическом уровне. Применение рассмотренных тракторов целесообразно на обработке почвы: вспашка, глубокое рыхление, лущение, фрезерование, культивация, боронование, прикатывание, чизелевание. На междурядной обработке использование данных тракторов общего назначения невозможно ввиду отсутствия регулировки колеи и использования шин с широким профилем.

Список источников

1. Medževėpytė U.K., Makaras R., Lukoševičius V., Keršys A. Evaluation of the Working Parameters of a Series-Hybrid Tractor under the Soil Work Conditions. *Tehniški vjesnik*. 2022;29(1):45-50. <https://doi.org/10.17559/TV-20200506072510>
2. Vigoroso L., Caffaro F., Cremasco M.M., Cavallo E. Improving tractor safety: A comparison between the usability of a conventional and enhanced rear-mounted foldable ROPS (FROPS). *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022;19(16):10195. <https://doi.org/10.3390/ijerph191610195>

2. Трактор DEUTZ-FAHR6230 TTV оборудован передним валом отбора мощности, поэтому он наиболее универсален и может использовать на передней навеске активные сельскохозяйственные машины, что повышает способность работать с навесными комбинированными сельскохозяйственными агрегатами. Модель обладает большей максимальной транспортной скоростью, чем отечественные аналоги, что сказывается на производительности машинно-тракторного агрегата в целом.

3. По показателю технологического уровня тракторы Кировец К-5 и БТЗ 254-К, имея одинаковое значение 0,72, превосходят импортный аналог DEUTZ-FAHR6230 TTV с показателем 0,69, что доказывает перспективность данных моделей тракторов при выполнении технологических процессов.

References

1. Medževėpytė U.K., Makaras R., Lukoševičius V., Keršys A. Evaluation of the Working Parameters of a Series-Hybrid Tractor under the Soil Work Conditions. *Tehniški vjesnik*. 2022;29(1):45-50. <https://doi.org/10.17559/TV-20200506072510>
2. Vigoroso L., Caffaro F., Cremasco M.M., Cavallo E. Improving tractor safety: A comparison between the usability of a conventional and enhanced rear-mounted foldable ROPS (FROPS). *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022;19(16):10195. <https://doi.org/10.3390/ijerph191610195>

3. Solovyev R., Kolomeichenko A., Cheranev S., Gerasimov M., Gribov I. Modular design of diesel-electric tracked tractor with high degree of automation. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;2061:012051. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2061/1/012051>
4. Solovyev R., Cheranev S., Karyakin S., Kolomeichenko A., Gribov I., Evgrafov V., Mezentsev N. The need for creation of high-tech tractors of 0.6-2 traction classes with high degree of automation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;819:012026. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/819/1/012026>
5. Перевозчикова Н.В., Родченков Д.А., Грибов И.В. Оценка потребительских свойств тракторов Джон Дир // Вестник ФГОУ ВО «МГАУ имени В.П. Горячкина». 2016. № 1. С. 40-44. EDN: VNXNOP
6. Грибов И.В., Перевозчикова Н.В. Оценка потребительских свойств тракторов Беларусь // Вклад молодых ученых в аграрную науку: Материалы Международной научно-практической конференции. Кинель: Самарская государственная сельскохозяйственная академия, 2016. С. 349-352. EDN: WJFRLZ
7. Грибов И.В., Перевозчикова Н.В. Применение метода экспертных оценок при определении показателей технологических свойств тракторов CLAAS // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». 2017. № 1 (77). С. 30-34. EDN: XVDGKB

Информация об авторах

- ¹ **Грибов Иван Васильевич**, канд. техн. наук, заведующий отделом центра сельскохозяйственного машиностроения; SPIN-код: 2101-3063, AuthorID: 953903; ivan.gribov@nami.ru
 - ² **Зенин Артем Сергеевич**, вед. специалист центра сельскохозяйственного машиностроения; SPIN-код: 4086-9340, AuthorID: 704814; artem.zenin@nami.ru
 - ³ **Коломейченко Александр Викторович**, д-р техн. наук, профессор, заведующий отделом центра сельскохозяйственного машиностроения; SPIN-код: 2560-5163, AuthorID: 347926; a.kolomeychenko@nami.ru
 - ⁴ **Шипов Максим Владимирович**, начальник управления центра сельскохозяйственного машиностроения; maxim.shipov@nami.ru
 - ⁵ **Карякин Сергей Борисович**, канд. техн. наук, заведующий отделом центра сельскохозяйственного машиностроения; sergey.karyakin@nami.ru
 - ⁶ **Перевозчикова Наталья Васильевна**, канд. техн. наук, доцент кафедры тракторов и автомобилей, SPIN-код: 8670-3338, AuthorID: 874025; n.perevozchikova@rgau-msha.ru
- ^{1,2,3,4,5} Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт «НАМИ»; 125438, Российская Федерация, г. Москва, ул. Автомоторная, д. 2
- ⁶ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Вклад авторов

И.В. Грибов – аналитика, методология, создание окончательной версии рукописи;
 А.С. Зенин – редактирование;
 А.В. Коломейченко – аналитика;
 М.В. Шипов – администрирование проекта;
 С.Б. Карякин – концептуализация, ресурсы;
 Н.В. Перевозчикова – актуальность проблемы

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 28.02.2024, после рецензирования и доработки 01.10.2024; принята к публикации 23.10.2024.

3. Solovyev R., Kolomeichenko A., Cheranev S., Gerasimov M., Gribov I. Modular design of diesel-electric tracked tractor with high degree of automation. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;2061:012051. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2061/1/012051>
4. Solovyev R., Cheranev S., Karyakin S., Kolomeichenko A., Gribov I., Evgrafov V., Mezentsev N. The need for creation of high-tech tractors of 0.6-2 traction classes with high degree of automation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;819:012026. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/819/1/012026>
5. Perevozchikova N.V., Rodchenkov D.A., Gribov I.V. Assessment of consumer properties of John Deere tractors. *Vestnik of Moscow Goryachkin State Agroengineering University*. 2016;1:40-44. (In Russ.)
6. Gribov I.V., Perevozchikova N.V. Assessment of consumer properties of Belarus tractors. In: *Contribution of Young Scientists to Agrarian Science: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. Kinel: SGSKhA (Samara State Agricultural Academy), 2016. P. 622. (In Russ.)
7. Gribov I.V., Perevozchikova N.V. The use of expert judgment in the determination of the technological properties of tractors CLAAS. *Vestnik of Moscow Goryachkin State Agroengineering University*. 2017;1:30-34. (In Russ.)

Authors Information

- ¹ **Ivan V. Gribov**, CSc (Eng), Department Manager, Agricultural Engineering Center, ivan.gribov@nami.ru
 - ² **Artem S. Zenin**, Lead Expert, Agricultural Engineering Center, artem.zenin@nami.ru
 - ³ **Aleksandr V. Kolomeychenko**, DSc (Eng), Professor, Department Manager, Agricultural Engineering Center; a.kolomeychenko@nami.ru
 - ⁴ **Maksim V. Shipov**, Head of Directorate, Agricultural Engineering Center, maxim.shipov@nami.ru
 - ⁵ **Sergey B. Karyakin**, CSc (Eng), Department Manager, Agricultural Engineering Center; sergey.karyakin@nami.ru
 - ⁶ **Natalia V. Perevozchikova**, CSc (Eng), Associate Professor, the Department of Tractors and Automobiles; n.perevozchikova@rgau-msha.ru
- ^{1,2,3,4,5} Central Scientific Research Automobile and Automotive Engines Institute – FSUE “NAMI”; Moscow, 125438, Russian Federation
- ⁶ Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation

Author Contribution

I.V. Gribov – analytics, methodology, writing – finalizing (revising and editing) of the manuscript;
 A.S. Zenin – editing;
 A.V. Kolomeychenko – analytics;
 M.V. Shipov – project administration;
 S.B. Karyakin – conceptualization, resources;
 N.V. Perevozchikova – conceptualization;

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism
 Received 28.02.2024; Revised 01.10.2024; Accepted 23.10.2024

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 53.087.44:58.084.1

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-59-67>



Установка для исследования механизмов трансформации CO₂ в системе «Почва-растение-атмосфера»

Ю.К. Альтудов¹, З.И. Дударов^{2✉}, А.Х. Занилов³, Ю.Х. Шогенов⁴

^{1,2,3} Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова; г. Нальчик, Россия

⁴ Российская академия наук; г. Москва, Россия

¹ yka@kbsu.ru; <https://orcid.org/0009-0005-2520-8267>

² zalim-dudar@yandex.ru ✉; <https://orcid.org/0000-0001-5346-363X>

³ amiran78@inbox.ru; <https://orcid.org/0009-0002-8635-6501>

⁴ yh1961s@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7588-0458>

Аннотация. Качественное исследование механизма трансформации парникового углекислого газа в системе «Почва-растение-атмосфера» требует наличия соответствующего инструментария, позволяющего создавать модели экосистем, регистрировать происходящие в них преобразования и обрабатывать полученные данные. Для расширения методологии исследования потоков углекислого газа разработана установка для исследования механизмов трансформации CO₂ в системе «Почва-растение-атмосфера», моделирующая и обеспечивающая автономную жизнедеятельность растительного организма с параллельной регистрацией и демонстрацией суточной динамики концентрации CO₂ внутри полностью замкнутой системы. Для более детализированной оценки направленности трансформации углекислого газа установка обеспечивает полную изоляцию листовой и подземной частей растений. В апробации установки участвовал саженец павловнии массой 7,47 г, сформированные корни которого погружались в речной песок, обогащенный раствором нитроаммофоски (NPK 16:16:16). В течение 30 суток каждые 5 мин измерительный комплекс iMK LoRa регистрировал поглощение и выделение CO₂ в двух зонах установки. В результате модельного эксперимента установлено, что растение способно продолжать свои развитие и рост при отсутствии внешнего источника углекислого газа, а формирование биомассы (+111,8%) происходит за счет механизма корневого углеродного питания. В данном случае почвенный углерод частично (на 76,4%) переходит в атмосферу в результате дыхания растения и снова поглощается в световую фазу, тем самым обеспечивая «малый углеродный цикл». Другая часть почвенного углерода (на 23,6%) принимает непосредственное участие в формировании биомассы растений, минуя преобразование через листовой аппарат. Предложенная установка позволит выявить особенности режимов углеродного питания различных сельскохозяйственных культур для дальнейшего подбора средств и агротехнических приемов по регулированию биомассы.

Ключевые слова: баланс CO₂, газоанализатор, корневое углеродное питание, воздушное питание растений, малый углеродный цикл, «Почва-растение-атмосфера»

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ, мнемокод FZZR-2023-0010.

Для цитирования: Альтудов Ю.К., Дударов З.И., Занилов А.Х., Шогенов Ю.Х. Установка для исследования механизмов трансформации CO₂ в системе «Почва-растение-атмосфера» // Агроинженерия. 2024. Т. 27, № 1. С. 59-67. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-59-67>

ORIGINAL ARTICLE

Installation for studying the mechanisms of CO₂ transformation in the “Soil-Plants-Atmosphere” system

Yu.K. Altudov¹, Z.I. Dudarov²✉, A.H. Zanirov³, Yu.Kh. Shogenov⁴

^{1,2,3} Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov; Nalchik, Russia

⁴ Russian Academy of Sciences; Moscow, Russia

¹ yka@kbsu.ru; <https://orcid.org/0009-0005-2520-8267>

² zalim-dudar@yandex.ru✉; <https://orcid.org/0000-0001-5346-363X>

³ amiran78@inbox.ru; <https://orcid.org/0009-0002-8635-6501>

⁴ yh1961s@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7588-0458>

Abstract. A qualitative study of greenhouse carbon dioxide transformation in the soil-plant-atmosphere system requires appropriate tools to make ecosystem models, record the occurring transformations, and process the obtained data. To expand the methodology for studying carbon dioxide flows, the authors developed an installation for studying the mechanisms of CO₂ transformation in the soil-plant-atmosphere system, simulating and ensuring autonomous vital activity of a plant organism with parallel recording and demonstration of the daily dynamics of CO₂ concentration inside a completely closed system. For a more detailed assessment of carbon dioxide transformation, the installation ensures complete isolation of the leaf and underground parts of plants. A foxglove tree (*Paulownia*) seedling weighing 7.47 g was used to test the installation; its formed roots were immersed in river sand enriched with a solution of nitroammophoska (NPK 16:16:16). For 30 days, the iMK LoRa measuring system recorded the absorption and emission of CO₂ in two zones of the installation every 5 minutes. The model experiment showed that the plant is able to continue its development and growth in the absence of an external source of carbon dioxide, and biomass (+111.8%) is formed due to the mechanism of root carbon nutrition. In this case, soil carbon partially (76.4%) goes into the atmosphere as a result of plant respiration and is again absorbed in the light phase, thereby providing a “small carbon cycle”. Another part of the soil carbon (23.6%) takes direct part in the formation of plant biomass, bypassing the transformation through foliation. The proposed installation can identify the features of carbon nutrition modes of various agricultural crops for further selection of means and agrotechnical methods for biomass regulation.

Keywords: CO₂ balance, gas analyzer, root carbon nutrition of plants, air nutrition of plants, inner carbon cycle, “Soil-Plant-Atmosphere” system

Funding: The research work was carried out within the framework of a State assignment from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation with the project code FZZR-2023-0010.

For citation: Altudov Yu.K., Dudarov Z.I., Zanirov A.H., Shogenov Yu.Kh. Installation for studying the mechanisms of CO₂ transformation in the “Soil-Plants-Atmosphere” system. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;26(1):59-67 <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-59-67>

Введение

Ключевую роль в формировании растительной биомассы выполняет углекислый газ (CO₂), который наряду с водой в процессе фотосинтеза под действием световой энергии преобразуется в пластические вещества. Считается, что основным путем поступления углерода в растение является воздушное углеродное питание. Однако данные научной литературы свидетельствуют о наличии не менее важного механизма поступления углерода в растения – корневого углеродного питания, которому в современных практических исследованиях уделяется недостаточное внимание.

В работе [1] была исследована возможность эффективного использования углекислого газа с поливной водой при производстве овощных культур. Способность поглощения диоксида углерода корневой системой растений с использованием

радиоизотопного метода была продемонстрирована советскими учеными [2]. Данный эффект подтверждают и более ранние источники [3].

Проведенный на гидропонной установке эксперимент выявил способность растений к фотосинтезу и активному росту в условиях полного перехода на корневое углеродное питание [4]. Было показано, что при необходимости растения способны осуществлять фотосинтез с привлечением углерода, поступающего через корни. Это свидетельствует о возможном использовании данного механизма в качестве альтернативы листового поглощения углекислого газа (воздушное питание растений).

Имеющиеся результаты исследований не нашли своего применения на практике, в связи с чем отсутствуют комплексные технологии использования диоксида углерода в качестве полноценного элемента

корневого питания растений. В связи с этим имеющийся инструментарий по определению корневого углеродного питания носит характер точечных определений для установления самого факта корневого поглощения и не позволяет проводить долгосрочные исследования и моделировать эксперименты в условиях, приближенных к естественным.

Актуальность использования установки в отрасли сельского хозяйства связана с возможностью установления особенностей режимов углеродного питания различных сельскохозяйственных культур с целью дальнейшего подбора средств и агротехнических приемов по регулированию углеродного режима питания растений.

В настоящее время существуют способы и оборудование, используемые для определения эмиссии CO_2 ,

в том числе газоаналитические. При этом зарегистрированных средств, определяющих объем диоксида углерода, поглощенного корневой системой растений, не существует.

Цель исследований: экспериментальная оценка работоспособности созданной установки учета эмиссии CO_2 в замкнутом биоцикле «Почва-растение-атмосфера», позволяющая дифференцированно исследовать вклад и интенсивность корневого и листового углеродного питания в общем жизненном цикле растений.

Материалы и методы

Объектом исследований является двухкамерная установка, созданная для изучения механизмов трансформации CO_2 в системе «Почва-растение-атмосфера» (рис. 1) [5]. Установка состоит

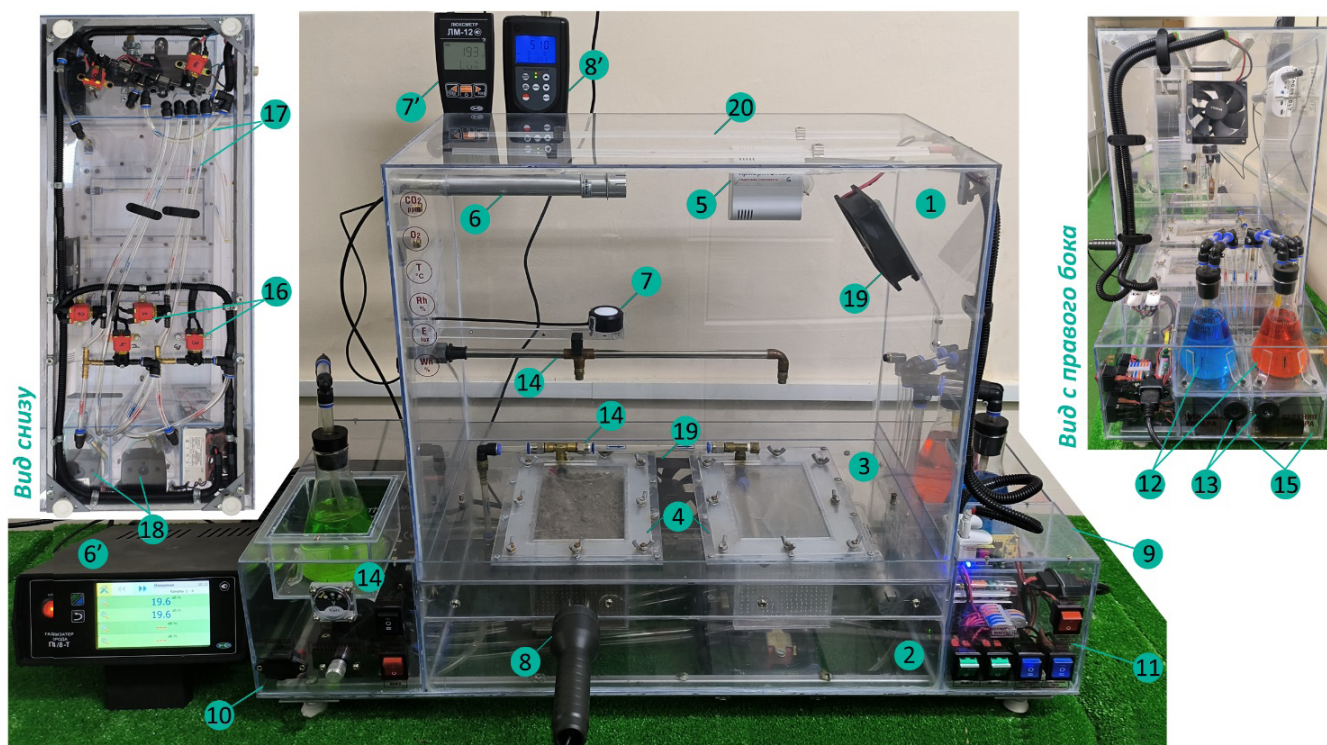


Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки:

- 1 – верхняя листовая камера; 2 – нижняя корневая камера; 3 – изолирующая перегородка;
 4 – лотки с почвой для выращивания растений; 5 – датчик концентрации CO_2 , температуры и влажности воздуха;
 6 и 6' – датчики O_2 и газоанализатор кислорода соответственно; 7 и 7' – фотометрический зонд и люксметр соответственно;
 8 – зонд и влагомер почвы; 9 и 10 – боковые дополнительные боксы; 11 – электрический блок установки с тумблерами;
 12 – ловушки CO_2 листовой и корневой камер; 13 – механические клапаны листовой и корневой камер;
 14 – система полива и фертигации; 15 – компрессорные камеры;
 16 и 17 – автоматизированные электромагнитные клапаны и воздушные трубки, смонтированные под основанием установки;
 18 – микрокомпрессоры; 19 – вентиляторы; 20 – фитолампа

Fig. 1. General view of the experimental installation:

- 1 – upper leaf chamber; 2 – lower root chamber; 3 – insulating partition; 4 – trays with soil for growing plants;
 5 – sensor of CO_2 concentration, temperature and air humidity; 6 and 6' – O_2 sensors and oxygen gas analyzer, respectively;
 7 and 7' – photometric probe and lux meter, respectively; 8, 8' – probe and soil moisture meter; 9 and 10 – additional side boxes;
 11 – electrical module of the unit with toggle switches; 12 – CO_2 traps of the leaf and root chambers;
 13 – mechanical valves of the leaf and root chambers; 14 – irrigation and fertigation system; 15 – compressor chambers;
 16 and 17 – automated electromagnetic valves and air tubes mounted under the unit base; 18 – microcompressors;
 19 – fans; 20 – phytolamp

из двух частей: верхней листовой камеры 1 и нижней корневой камеры 2. Верхняя камера представляет собой бокс высотой 40 см, глубиной 30 см и шириной 50 см с боковыми гранями из прозрачного монолитного поликарбоната толщиной 3 мм. Нижняя корневая камера, выполненная из того же материала, имеет высоту 15 см, глубину 30 см и ширину 50 см. Размеры используются для пересчета объема углекислого газа в атмосфере камеры из относительных показателей (ppm) в физические параметры (мг CO_2). Для этого используется масса диоксида углерода, равная $1,84 \text{ мг/м}^3$.

Камеры разделены между собой перегородкой 3 с вырезами под лотки 4 с почвой/субстратом для выращивания растений. Перегородка изолирует части установки друг от друга и препятствует перемещению газового состава из одной камеры в другую.

В лотках 4 на боковых гранях имеются отверстия диаметром 1 мм, позволяющие беспрепятственно попадать почвенным газам в нижнюю камеру 2 и обратно.

Во время эксперимента по разделению процессов корневого и листового углеродного питания в биоцикле «Почва-растение-атмосфера» после появления всходов поверхность почвы в лотках покрывали нейтральным для растений и почвы жидким латексом, который препятствовал проникновению почвенного воздуха в верхнюю камеру и атмосферным газам верхней камеры в почву. Практика использования данной экспериментальной установки показала, что такой подход позволяет надежно

дифференцировать зоны для отдельного детального анализа процессов, протекающих в верхней и нижней частях растений.

Для создания благоприятных условий растениям и моделирования циклов, близких к реальным, в каждой камере осуществляли независимый контроль концентрации углекислого газа (CO_2), температуры (T), влажности воздуха (Rh), концентрации кислорода (O_2), освещенности (E) (только в верхней камере) и объемной влажности почвы (W) (только в нижней камере) (рис. 2).

Параметры CO_2 , T и Rh контролировали через единый измерительный комплекс 5 iMK LoRa (производство ООО «Измерение и Контроль», г. Санкт-Петербург), взаимодействующий по протоколу LoRaWAN с контроллером микроклимата iMK 2500, который подключен к Интернету и облачному сервису. Данные с периодичностью 1, 5 или 10 мин, задаваемые исследователем в зависимости от решаемых задач, передаются на сервер сбора данных. Исходные показатели с облачного сервера можно экспортировать в любой момент, в том числе с учетом предварительных процедур обработки, а именно усреднение временного ряда с шириной окна для сглаживания 5 мин, 1 ч, 3 ч и сутки. Параметры контролировались в режиме реального времени с возможностью получения уведомлений на мобильное устройство в случае отклонения от заданных опытных значений. Через специальные SMS-команды возможно дистанционное управление экспериментальным процессом.

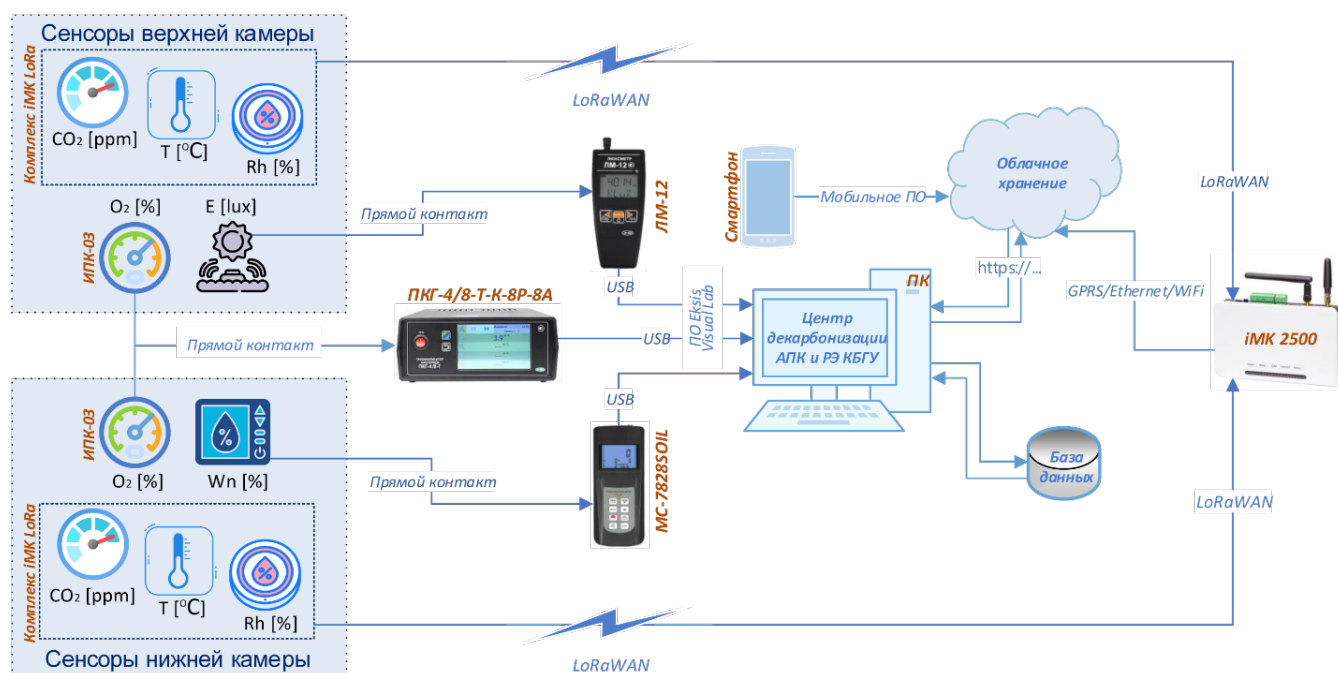


Рис. 2. Структурная блок-схема установки

Fig. 2. Structural block diagram of the installation

Комплекс iMK LoRa, работающий по технологии недисперсный инфракрасный (NDIR) и оснащенный функцией Automatic Baseline Correction, позволяет контролировать концентрацию CO_2 в диапазоне 0...5000 ppm (частей на миллион) с разрешением 1 ppm и точностью определения ± 30 ppm. Технология предусматривает выполнение автоматической калибровки без использования технических газов, температуры в пределах от +2 до +50°C с точностью 0,1°C и влажности воздуха (Rh) без конденсата 20...80%.

В случае нарушения работоспособности комплекса и его перезапуска во время эксперимента в камеры установки интегрированы механические узлы, позволяющие манипулировать измерительными блоками, не нарушая герметичность камер и не прерывая исследования.

Непрерывный мониторинг концентрации кислорода (O_2) производили в камерах датчиками 6 микрофонного типа ИПК-03 (производство АО «Экологические сенсоры и системы», г. Зеленоград) с диапазоном измерения 0...30% об. долей и точностью определения $\pm 0,4\%$ об. долей, подключенных к газоанализатору 6' кислорода ПКГ-4/8-Т-К-8Р-8А(Е5) той же фирмы, который управлялся программным обеспечением Eksis Visual Lab.

Для контроля электромагнитного светового воздействия на опытные растения в листовую камеру интегрирован фотометрический зонд 7 с диапазоном измерения 1...200000 Лк, подключенный к внешнему цифровому регистратору 7' марки ЛМ-12 (производство АО «Экологические сенсоры и системы», г. Зеленоград).

Установленный в лоток с почвой профессиональный влагомер MC-7828 Soil (8, 8') позволял контролировать объемную влажность почвы в диапазоне 0...100% с точностью $\pm 1,5\%$.

Управление экспериментальным процессом осуществлялось с помощью реализованных в установке технических узлов:

- систем извлечения (утилизации) избыточной концентрации CO_2 в камерах и подачи воздуха с естественным содержанием кислорода;
- системы имитации воздушного потока и перемешивания воздушной массы внутри камер;
- системы регулирования освещенности;
- системы регулирования влажности почвы, обеспечивающей управление поливом с функцией фертигации и распыления средств защиты растений и удобрений.

По бокам нижней камеры (рис. 1) установлены прозрачные дополнительные боксы (9, 10). В правом боксе 9, разделенном на три части, размещены

электрический блок установки 11, система извлечения (утилизации) 12 избыточной концентрации CO_2 и система подачи воздуха 13 из внешней атмосферы. В левом дополнительном боксе 10 размещена система регулирования влажности почвы с учетом фертигации и распыления средств защиты растений и удобрений 14.

С целью улавливания избыточной концентрации углекислого газа воздушные массы верхней и нижней камер принудительно продувались сквозь емкость 12 с абсорбирующим раствором (ловушки). Для подачи воздуха в камеру с естественным содержанием кислорода использовались механические клапаны 13 на боковых гранях изолированных компрессорных камер 15.

Соответствующие нижней и верхней камерам ловушки 12 установлены в нише над компрессорными камерами 15. Направления воздушных масс регулировали автоматизированными электромагнитными клапанами 16 и воздушными трубками 17, расположенными в нижней части установки. Микрокомпрессоры 18 и электромагнитные клапаны включали/отключали соответствующими тумблерами, размещенными на лицевой стороне электрического блока 11.

Перемешивание воздушной массы в верхней и нижней камерах осуществляли вентиляторами 19. Источник тока вентиляторов и тумблеры включения/отключения размещены на лицевой стороне электрического блока.

Световой режим в установке поддерживали специализированными фитолампами 20 мощностью 15 Вт с фотосинтетическим фотонным потоком 22,5 мкмоль/с с длиной волн красного спектра 630...670 нм и длиной синего спектра 420...460 нм, которые включались/отключались тумблером на лицевой стороне электрического блока 11. Имитация светового режима в установке достигалась фотопериодичностью 12 ч.

Интегрированная в установку система полива и опрыскивания (14), состоящая из диафрагменного насоса, электромагнитных клапанов, регулирующих направление жидкости, емкости и магистралей для подачи жидкости, специального рукава с распылительными форсунками, позволила поддерживать влажность почвы на должном уровне в лотках, установленных внутри камеры, и вносить средства защиты растений и удобрения.

Апробация установки для оценки возможного вклада корневого углеродного питания в формирование растительной биомассы проводилась на базе центра декарбонизации АПК и региональной экономики КБГУ им. Х.М. Бербекова. В модельном

эксперименте в качестве объекта исследований использовался саженец павловнии войлочной (*Paulownia tomentosa* (Thuns.) Steud., 1841) со сформированной корневой системой. Демонстрация возможности регистрации необходимых параметров в установке с растением, имеющим аналогичный со всеми другими автотрофными растениями механизм поглощения CO_2 , свидетельствует о пригодности технического решения для изучения особенностей углеродного питания всех автотрофных растений, в том числе сельскохозяйственных.

Масса саженца естественной влажности на момент погружения в модуль составила 7,47 г. В качестве субстрата использовался промытый речной песок (0,8 кг), обогащенный минеральными элементами питания в виде комплексного удобрения нитроаммофоски (NPK 16:16:16) в дозе 10 г в физическом весе. Измерительный комплекс iMK LoRa регистрировал поглощение и выделение CO_2 каждые 5 мин. По пикам концентрации CO_2 (рис. 3), которые приходились на момент смены светового режима, рассчитывался суточный баланс углекислого газа. Продолжительность эксперимента составила 30 суток.

Расчет дополнительно сформированной биомассы производился после извлечения саженца из камеры. Очищенный от песка саженец взвешивался.

Замерялась его влажность, и дифференцированно определялось содержание углерода в листьях, корнях и стебле с использованием элементарного анализатора углерода MultiEA 200CS при температуре 1100°C.

По сопоставлению данных о массе C- CO_2 в атмосфере установки к массе углерода, накопленного саженцем за 30 суток, устанавливались факт наличия альтернативного механизма поглощения углерода и его количественное определение.

Результаты и их обсуждение

В результате проведенного эксперимента было установлено, что способность вегетирующего саженца павловнии войлочной поглощать CO_2 из атмосферы имеет свои пределы.

Вследствие ночного дыхания саженца павловнии прослеживается рост концентрации CO_2 в атмосфере камеры (синяя линия на рисунке 3). Начиная с третьих суток пики суточных концентраций (поток) варьируют в пределах 223...371 ppm (среднее значение 341 ppm). В световую фазу выделенный растением углекислый газ поглощается (сток) до пределов 123...78 ppm (среднее значение 109 ppm), что отражает потенциал растительной углеродной секвестрации (красная линия на рисунке 3). В результате в камере формируется среднесуточный баланс CO_2 – 232 ppm, отражающий разницу между

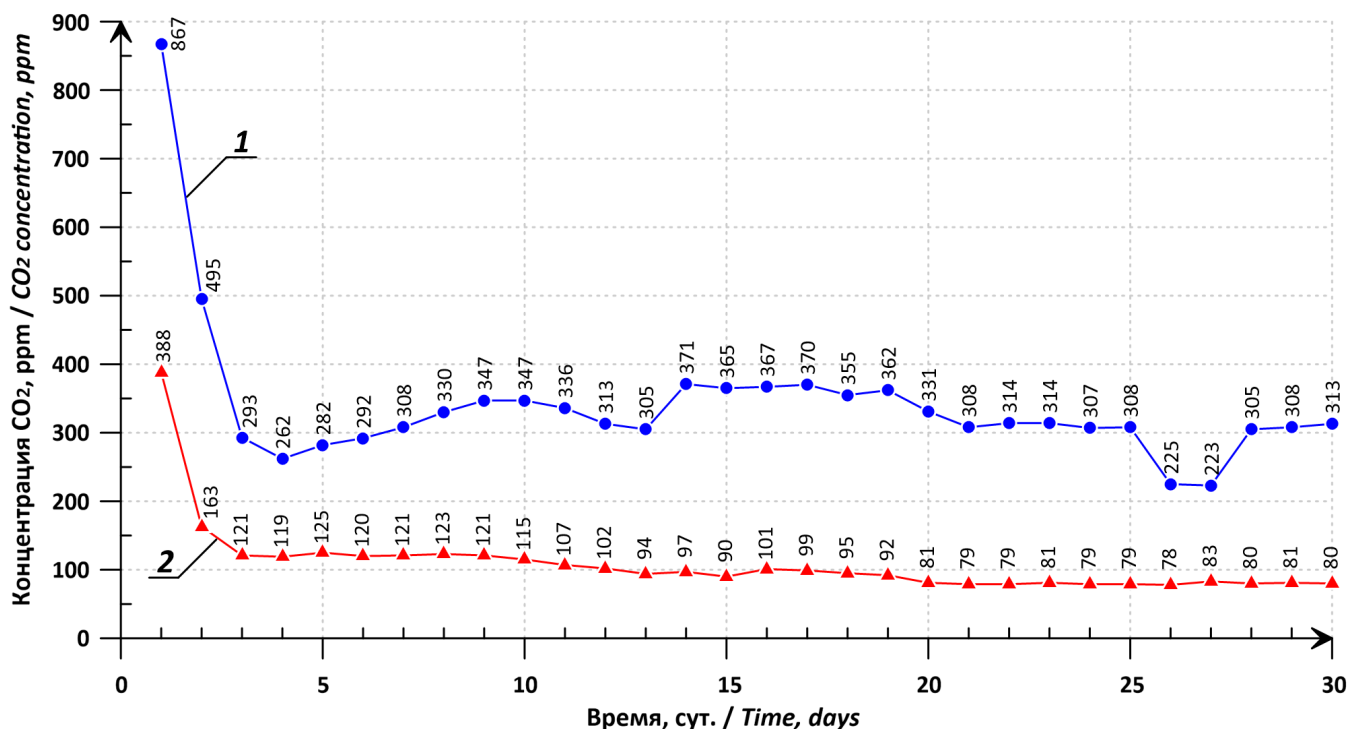


Рис. 3. Пики суточных концентраций CO_2 в камере:
1 – поток; 2 – сток

Fig. 3. Peaks of daily CO_2 concentrations in the chamber:
1 – flow; 2 – uptake

средними значениями ночного и светового режимов. При этом месячный баланс составляет, соответственно, 6960 ppm. В светлую фазу растением поглощается объем углекислого газа, выделенный самим же растением в ночную фазу, без поступления извне, что рассматривается как малый внутренний цикл [6]. По данным А.В. Наумова¹, его вклад в формирование чистой первичной продукции может достигать 60%. Случаи преобладания потока над стоком углекислого газа отмечаются в естественных лесных экосистемах [7].

С позиции устоявшихся убеждений в исключительности воздушного углеродного питания растений и того, что дыхание растений сопряжено с распадом части ранее синтезированного органического вещества [8], следует ожидать, что биомасса экспериментального саженца павловнии войлочной должна увеличиться. В нашем опыте биомасса экспериментального растения возросла с 7,47 до 15,82 г, то есть на 8,35 г, или на 111,8%, за счет как образования новых пар листьев с момента закладки опыта, так и увеличения площади имевшихся листьев.

Было установлено, что в приращенной биомассе (8,35 г) при влажности саженца 91,74% содержится 274,9 мг поглощенного ею углерода (рис. 4). При этом из листовой (верхней) камеры было поглощено лишь 210,0 мг углерода. Расчет массы углерода, образуемой в листовой камере в течение эксперимента, производился по формуле:

$$M = (C \cdot T \cdot m \cdot V) / K = \\ = (232 \text{ ppm} \cdot 30 \text{ сут.} \cdot 1,84 \text{ мг/м}^3 \cdot 0,06 \text{ м}^3) / 3,66 = 210 \text{ мг,}$$

где М – масса углерода в атмосфере камеры, принявшая участие в формировании биомассы, мг; С – среднесуточный баланс CO_2 в атмосфере камеры, ppm; Т – продолжительность наблюдения, сут.; m – масса CO_2 в 1 м³ камеры, мг/м³; V – объем камеры, м³; К – коэффициент пересчета CO_2 в элементарный углерод.

Из расчетов следует, что в формировании биомассы саженца вклад углерода из листовой камеры составляет 76,4%. Поскольку система в экспериментальной установке была замкнутой и доступа к источникам углерода извне не было, то остальные 23,6% углерода, по нашему мнению, приходятся непосредственно на корневое поглощение с преобразованием его в биомассу растения. Таким образом, в системе «Растение-атмосфера» был выделен «малый углеродный цикл», на долю которого

¹ Наумов А.В. Дыхание почвы: составляющие, экологические функции, географические закономерности: Монография. Новосибирск: Издательство Сибирского отделения РАН, 2009. 208 с.

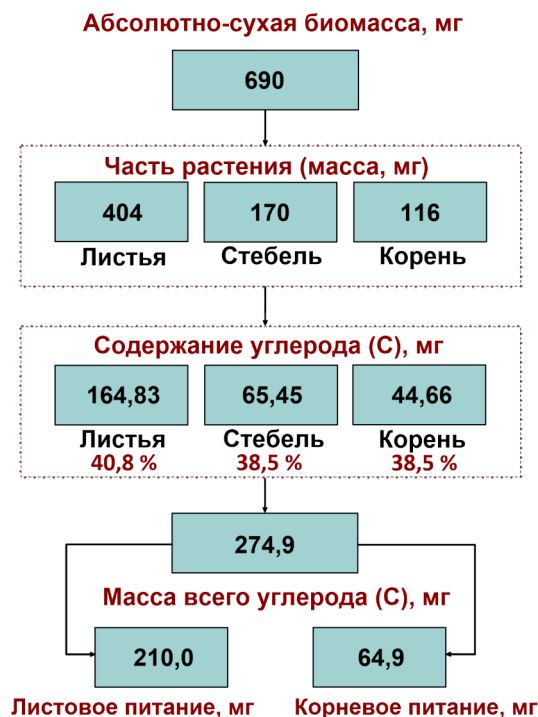


Рис. 4. Содержание углерода в приращенной биомассе, мг

Fig. 4. Carbon content in the incremented biomass, mg

приходится 76,4% поглощенного углерода, и подтверждено наличие механизма корневого углеродного питания, доля которого в модельном эксперименте составила 23,6%.

На основе полученных данных можно рассмотреть возможность модернизации традиционной схемы углеродного цикла (рис. 5).

В представленной схеме (рис. 5) часть углерода, выделяемого в результате дыхания почвы, перехватывается вегетирующими растениями, поддерживая механизм воздушного питания растений. Часть почвенного углерода, в том числе в виде углекислого газа, поглощается непосредственно корневой системой.

Выводы

Результаты апробации установки для определения интенсивности листового и корневого углеродного питания позволили подтвердить наличие «малого углеродного цикла» в системе «Растение-атмосфера», доля поглощенного углерода в котором оценивается в эксперименте в 76,4%, а также наличие корневого поглощения углерода (23,6%), принявшего непосредственное участие в формировании биомассы растений.

Полученные данные указывают на научно-практическую значимость изобретения и открывают перспективы для его использования в целях изучения поведения отдельных компонентов экосистем и разработки технологий углеродной секвестрации.

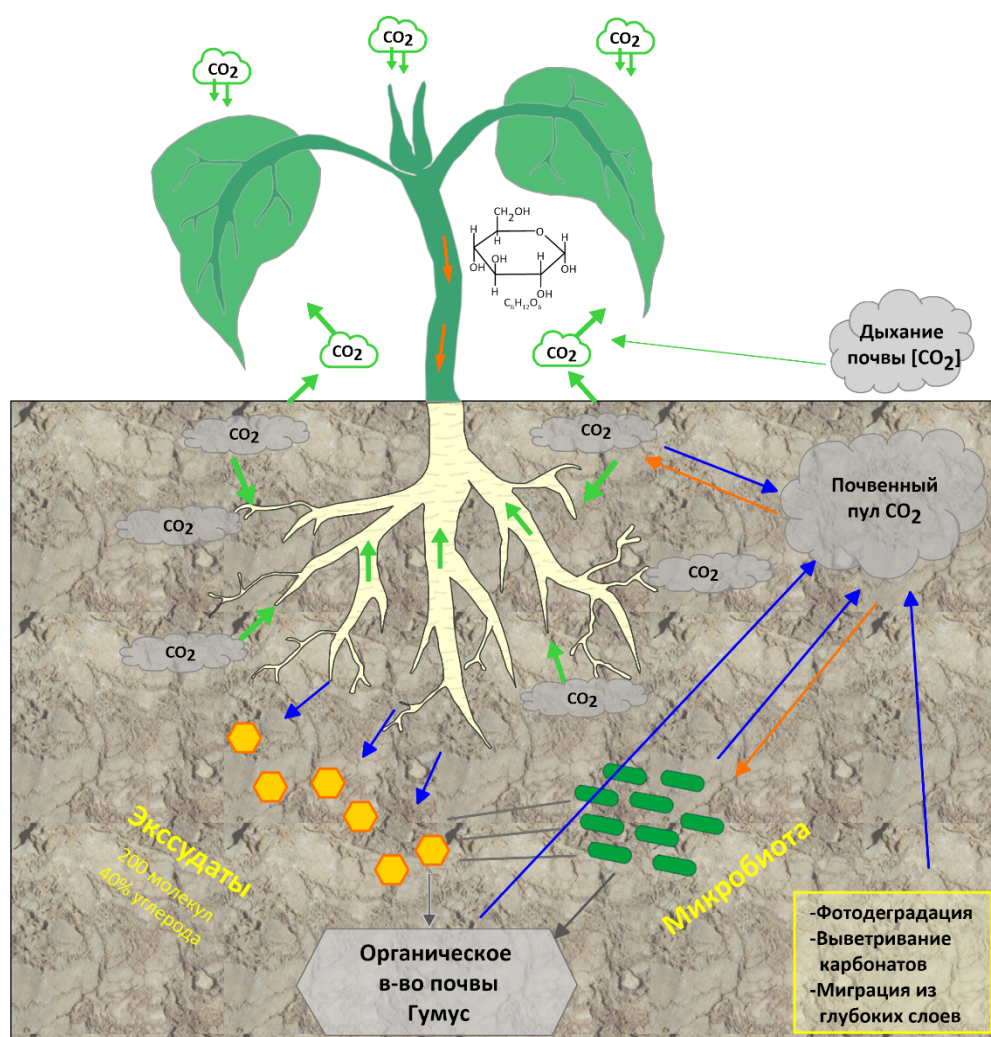


Рис. 5. Модель углеродного питания растений

Fig. 5. Model of carbon nutrition of plants

Список источников

1. Ильин С.Н. Применение углекислого газа в качестве подкормки в защищенном грунте // Вестник ИрГСХА. 2017. № 80. С. 88-91. EDN: ZFHROB
2. Курсанов А.Л. Использование в СССР радиоактивных изотопов в биологии и сельском хозяйстве // Доклады советской делегации на Международной конференции по мирному использованию атомной энергии «Применение изотопов в технике, биологии и сельском хозяйстве», г. Женева. М.: Издательство Академии наук СССР, 1955. С. 273-287. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/doklady-zheneva-1955_primnenie-izotopov_1955/p286/
3. Breazeale J.F. The absorbtion of carbon by the roots of plants. *Journal of Agreeculture Research*. 1924; XXVI(7):303-311
4. Покровский С.Г. Корневое углеродное питание растений – как возможный источник ошибок радиоуглеродного датирования // Актуальные проблемы современной науки. 2006. № 6 (32). С. 214-217. EDN: IJGVHN
5. Альтудов Ю.К., Дударов З.И., Занилов А.Х. Система учета баланса CO₂ в цикле «почва – растение – атмосфера» // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2023. № 6 (116). С. 13-20. <https://doi.org/10.35330/1991-6639-2023-6-116-13-20>
6. Смагин А.В., Глаголев М.В., Суворов Г.Г., Шнырев Н.А. Методы исследования потоков газов и состава почвенного

References

1. Ilyin S.N. Application of carbon dioxide as fertilizing in protected ground. *Vestnik IrGSHA*. 2017;80:88-91. (In Russ.)
2. Kursanov A.L. Use of radioactive isotopes in biology and agriculture in the USSR. *Reports of the Soviet delegation at the International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy "Application of Isotopes in Technology, Biology and Agriculture"*, Geneva. Moscow. Izdatel'stvo akademii nauk SSSR. 1955. P. 273-287 (In Russ.)
3. Breazeale J.F. The absorbtion of carbon by the roots of plants. *Journal of Agreeculture Research*. 1924; XXVI(7):303-311.
4. Pokrovskiy S.G. Root carbon nutrition of plants as a possible source of radiocarbon dating errors. *Aktualnye Problemy Sovremennoj Nauki*. 2006;6:214-217 (In Russ.)
5. Altudov Yu.K., Dudarov Z.I., Zanilov A.Kh. System for accounting for CO₂ balance in the "soil – plant – atmosphere" cycle. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2023;6(116):13-20. <https://doi.org/10.35330/1991-6639-2023-6-116-13-20> (In Russ.)
6. Smagin A.V., Glagolev M.V., Suvorov G.G., Shnyrev N.A. Methods for studying gas fluxes and the composition of soil air in field conditions using a portable PGA-7 gas analyzer. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 17: Pochvovedenie*. 2003;3:29-36 (In Russ.)

воздуха в полевых условиях с использованием портативного газоанализатора ПГА-7 // Вестник Московского университета. Серия 17 «Почвоведение». 2003. № 3. С. 29-36. EDN: TMFJGN

7. Botch M.S., Kobak K.I., Vinson T.S., Kolchugina T.P. Carbon pools and accumulation in peatlands of the former Soviet Union. *Global Biogeochemical Cycles*. 1995;9(1):37-46. <https://doi.org/10.1029/94GB03156>

8. Смасhevский Н.Д. Экология фотосинтеза // Астраханский вестник экологического образования. 2014. № 2 (28). С. 165-180. EDN: SFDJTF

Информация об авторах

¹ **Альтудов Юрий Камбулатович**, д-р техн. наук, д-р экон. наук, профессор, и.о. ректора; SPIN-код: 4372-3599, AuthorID: 258947; yka@kbsu.ru; <https://orcid.org/0009-0005-2520-8267>

² **Дударов Залим Исламович**, научный сотрудник Центра декарбонизации АПК и региональной экономики; SPIN-код: 7752-5370, AuthorID: 725802; zalim-dudar@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5346-363X>

³ **Занилов Амиран Хабинович**, канд. с.-х. наук, старший научный сотрудник Центра декарбонизации АПК и региональной экономики; SPIN-код: 2031-5449, AuthorID: 324946; amiran78@inbox.ru; <https://orcid.org/0009-0002-8635-6501>

⁴ **Шогенов Юрий Хасанович**, академик РАН, д-р техн. наук, начальник сектора механизации, электрификации и автоматизации отдела сельскохозяйственных наук; SPIN-код: 7335-0970, AuthorID: 483282; yh1961s@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7588-0458>

^{1,2,3} Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова (КБГУ); 360004, Россия, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173

⁴ Российская академия наук; 119334, Россия, г. Москва, Ленинский проспект, 32 А

Вклад авторов

Ю.К. Альтудов – концептуализация, руководство исследованием;

З.И. Дударов – разработка установки, проведение исследований, визуализация, анализ литературных источников и создание черновика рукописи;

А.Х. Занилов – методология, проведение исследований, формальный анализ, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;

Ю.Х. Шогенов – концептуализация, формулирование общих выводов.

Конфликт интересов

Авторы статьи заявляют, что конфликта интересов в отношении авторства и публикации нет.

Статья поступила 13.08.2024, после рецензирования и доработки 20.12.2024; принята к публикации 23.12.2024.

7. Botch M.S., Kobak K.I., Vinson T.S., Kolchugina T.P. Carbon pools and accumulation in peatlands of the former Soviet Union. *Global Biogeochemical Cycles*. 1995;9(1):37-46. <https://doi.org/10.1029/94GB03156>

8. Smashevskiy N.D. Ecology of photosynthesis. *Astrahanskiy Vestnik Ekologicheskogo Obrazovaniya*. 2014;2(28):165-180 (In Russ.)

Author Information

¹ **Yuri K. Altudov**, DSc(Eng), DSc(Econ), Professor, Acting Rector; yka@kbsu.ru; <https://orcid.org/0009-0005-2520-8267>

² **Zalim I. Dudarov**, Researcher Center for Decarbonization of the Agro-Industrial Sector and Regional Economy; zalim-dudar@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5346-363X>

³ **Amiran Kh. Zanirov**, Senior Researcher, Center for Decarbonization of the Agro-Industrial Sector and Regional Economy; amiran78@inbox.ru; <https://orcid.org/0009-0002-8635-6501>

⁴ **Yuri Kh. Shogenov**, Full Member of the RAS, DSc (Eng), Head of the Mechanization, Electrification and Automation Sector; yh1961s@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7588-0458>

^{1,2,3} Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov (KBSU); 360004, Kabardino-Balkarian Republic, Nalchik, Chernyshevskogo Str., 173

⁴ Agricultural Sciences Department, Federal State Budgetary Institution "Russian Academy of Sciences"; Russia, 119334, Moscow, Leninsky Ave., 32 A

Author Contribution

Yu.K. Altudov – conceptualization and research supervision;

Z.I. Dudarov – investigation, visualization, literature review, writing – original draft preparation;

A.Kh. Zanirov – methodology, investigation, formal analysis, writing – review and editing of the manuscript;

Yu.Kh. Shogenov – conceptualization, general conclusions.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interest regarding authorship and publication of this article.

Received 13.08.2024; Revised 20.12.2024; Accepted 23.12.2024

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 535.34:631.363

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-68-74>**Экспресс-диагностика комбикорма и его составляющих методом видимой и ближней инфракрасной спектроскопии****М.В. Беляков¹, Е.А. Никитин², Д.С. Пятченков³**^{1,2,3} Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия¹ bmw20100@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4371-8042>² evgeniy.nicks@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0918-2990>³ denis.piat@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5903-6142>

Аннотация. Экспресс-диагностика комбикорма на соответствие фактическому и заявленному составу весьма актуальна на рынке производства концентрированных комбикормов. Исследования проведены с целью анализа эффективности диагностики концентрированного комбикорма методом спектроскопии видимого и ближнего инфракрасного излучения и определения информативных спектральных диапазонов экспресс-диагностики комбикорма. Измерение спектров отражения и поглощения в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне проводили на приборе Foss NIRS2500. Измеряли спектральные характеристики поглощения в диапазоне от 0,4 до 2,5 мкм 4-компонентного комбикорма и его составляющих: барды кукурузной, шрота рапсового, жома свекловичного, кукурузы молотой. Установлено, что рассчитанные интегральные коэффициенты поглощения комбикорма и его компонентов в диапазоне 0,4...2,5 мкм различаются и статистически достоверны. Выявлено влияние фракционного состава компонентов на точность измерения оптических параметров. Несоответствие комбикормов рецептуре можно выявить при сравнении спектральных характеристик комбикормов и клетчатки. Сравнение спектров поглощения клетчатки, 4-компонентного комбикорма и 2-компонентного комбикорма из кукурузы и ячменя показало, что наибольшее отличие поглощательных свойств отдельных составляющих комбикорма наблюдается либо в коротковолновом диапазоне 0,4...1,2 мкм, либо в диапазоне свыше 1,65 мкм. При этом характеристики $\alpha(\lambda)$ в коротковолновом диапазоне менее системны, что требует выделения более узких спектральных интервалов, например: 0,40...0,54 или 1,13...1,22 мкм. Отличие спектральных поглощающих свойств комбикормов наиболее проявляется в коротковолновой области ($\lambda < 1,36$ мкм). Для клетчатки наибольшее различие в области – менее 800 нм. Представленные результаты послужат теоретической основой для разработки и производства оптической приборной базы для диагностики качества (соответствие заявленной рецептуре и компонентному составу) концентрированных комбикормов для животноводства.

Ключевые слова: комбикорм, экспресс-диагностика комбикорма, спектроскопия, спектральные характеристики поглощения, интегральный коэффициент поглощения, математическое ожидание

Для цитирования: Беляков М.В., Никитин Е.А., Пятченков Д.С. Экспресс-диагностика комбикорма и его составляющих методом видимой и ближней инфракрасной спектроскопии // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 1. С. 68-74. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-68-74>

ORIGINAL ARTICLE

Diagnostics of compound feeds and their components by visible and near infrared spectroscopy**M.V. Belyakov¹, E.A. Nikitin², D.S. Pyatchenkov³**^{1,2,3} Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Moscow, Russia¹ bmw20100@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4371-8042>² evgeniy.nicks@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0918-2990>³ denis.piat@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5903-6142>

Abstract. Fast diagnostics of the compliance of the actual composition of concentrated compound feeds to the prescribed one is one of the topical issues of the modern market of compound feed production. The article examines the efficiency of diagnosing the compound feed by spectroscopy of visible and near infrared radiation and identifies informative spectral ranges of the fast diagnosing of compound feeds. The reflection and absorption spectra in the near infrared range were measured using the Foss NIRS2500 instrument (Foss, Denmark). We measured spectral absorption characteristics in the range between 0.4 and 2.5 μm of four-component mixed fodder and its components – corn stillage, rapeseed meal,

beet pulp, and ground corn. It has been found that the calculated integral absorption coefficients of mixed fodder and its components in the range between 0.4 and 2.5 μm , differ and are statistically reliable. The studies have revealed influence of fractional composition of components on the accuracy of measurement of optical parameters. The incompliance of compound feeds with the prescribed formulation can be revealed by comparing the spectral characteristics of compound feeds and fiber. Comparison of absorption spectra of fiber, four-component mixed fodder and two-component mixed fodder from corn and barley revealed that the greatest difference in the absorption properties of individual components of compound feed is observed either in the short-wave range of 0.4 to 1.2 microns, or in the range above 1.65 microns. At the same time, the characteristics of $\alpha(\lambda)$ in the shortwave range are less systemic, which requires the allocation of narrower spectral intervals, for example, 0.40 to 0.54 or 1.13 to 1.22 microns. The difference in the spectral absorbing properties of various compound feeds is most evident in the short-wavelength region ($\lambda < 1.36$ microns). For fiber, the greatest difference is in the area of less than 800 nm. The presented results may serve as a theoretical basis for the development and production of an optical instrument base for quality diagnostics for compliance with the prescribed formulation and component composition of concentrated compound feeds used in animal husbandry.

Keywords: compound feeds, rapid evaluation of compound feeds, spectroscopy, absorption spectrum, integral absorption coefficient, mathematical expectation

For citation: Belyakov M.V., Nikitin E.A., Pyatchenkov D.S. Diagnostics of compound feeds and their components by visible and near infrared spectroscopy. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(1):68-74 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-68-74>

Введение

Выполнение сложных циклических операций и повышение качества получаемой продукции животноводства обуславливают развитие и внедрение в сельское хозяйство современных технологий [1].

Применение оборудования для приготовления концентрированных комбикормов на базе малых агропредприятий в последнее десятилетие привело к появлению большого ассортимента комбикормов от различных производителей.

Малые комбикормовые предприятия не обеспечены аналитической приборной базой и не осуществляют контроль качества производимой продукции посредством услуг химических лабораторий [2, 3]. Иногда заявленный состав не соответствует фактическому ввиду стремления производителя снизить себестоимость производимой продукции либо вследствие скрытной технической неисправности весоизмерительного оборудования.

Ранее проведенными нами исследованиям установлено, что каждый тип зерновой культуры имеет уникальные оптические свойства, который может быть распознан посредством измерения косвенных оптических параметров с использованием оптических приборов и фоточувствительных датчиков.

Спектроскопия ближнего инфракрасного диапазона (БИК) широко используется для качественного и количественного анализа. По сравнению с традиционными методами аналитической химии спектроскопия видимого и ближнего инфракрасного диапазона имеет преимущества по скорости и эффективности, требует минимальной подготовки образцов (или она отсутствует) и применима ко многим типам образцов.

Портативные БИК-спектрометры имеют возможность проводить спектральный анализ

непосредственно на месте использования сырья или его переработки. Миниатюризация позволила использовать спектроскопию ближнего инфракрасного диапазона на практике в аналитических сценариях, недоступных для стандартного лабораторного оборудования. Преимущества миниатюрной спектроскопии ближнего инфракрасного диапазона очевидны при быстром и неразрушающем анализе на месте [4, 5], например, агропродовольственных товаров [6]. Так, инфракрасная спектроскопия используется для обнаружения меламина в соевом шроте [7], обнаружения обработанных животных белков в кормах [8] и диагностики многих других биологических объектов [9].

С учетом опыта ранее проведенных исследований перспективным является использование метода спектроскопии видимого и ближнего инфракрасного излучения для экспресс-диагностики комбикорма.

Цель исследований: изучение возможностей диагностики комбикорма методом спектроскопии видимого и ближнего инфракрасного излучения и определение информативных спектральных диапазонов.

Задачами исследований являлось измерение спектральных характеристик гранулированного и молотого комбикорма и его составляющих, вычисление параметров спектров и нахождение диапазонов, наиболее подходящих для диагностики.

Материалы и методы

Для исследований были использованы образцы четырехкомпонентного комбикорма, состоящего из молотой кукурузы (38%), шрота рапсового (27%), жома свекловичного (20%), барды кукурузной (15%) и двухкомпонентного комбикорма, включающего в себя ячмень (63%) и кукурузу (37%). Спектры поглощения

2- и 4-компонентного комбикорма сравнивались со спектральной характеристикой клетчатки.

Измерение спектров отражения и поглощения в ближнем инфракрасном диапазоне проводили на приборе Foss NIRS2500 (Foss, Дания) (рис. 1).

Рабочий спектральный диапазон охватывает значительную часть видимого и ближнего инфракрасного излучения (400...2500 нм), спектральное разрешение 0,5 нм.

Были определены интегральные коэффициенты поглощения в спектральном диапазоне $\lambda_1 \dots \lambda_2$:

$$A = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \alpha(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

где $\alpha(\lambda)$ – спектральная характеристика поглощения; λ_1, λ_2 – границы спектрального диапазона, нм.



Рис. 1. Прибор Foss NIRS2500 с образцами комбикорма

Fig. 1. Foss NIRS2500 device with feed samples

Относительные погрешности ε определения коэффициента поглощения при многократных измерениях ($n = 10$) вычисляли по общепринятым формулам.

Для анализа полученных спектров вычисляли математическое ожидание M_λ :

$$M_\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \lambda \alpha(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

где $\alpha(\lambda)$ – распределение плотности вероятности; λ_1, λ_2 – минимальное и максимальное значение длин волн диапазона, нм.

Результаты и их обсуждение

Для проведения теоретической оценки и определения перспективы использования методов спектроскопии видимого и ближнего инфракрасного излучения для экспресс-диагностики концентрированного комбикорма были измерены оптические свойства 4-компонентного комбикорма и его составляющие по отдельности.

Измеряли спектральные характеристики поглощения в диапазоне от 0,4 до 2,5 мкм. При этом ближний инфракрасный спектр (0,8...2,5 мкм) регистрирует обертоновые и комбинированные полосы молекулярных колебаний [10].

Результаты измерения комбикорма и его составляющих представлены на рисунке 2.

Полученные характеристики свидетельствуют о том, что во всех исследованных образцах имеются максимумы при длине волны 0,46; 1,2; 1,45; 1,73; 1,93; 2,06; 2,3 мкм. Аналогичный вид спектров

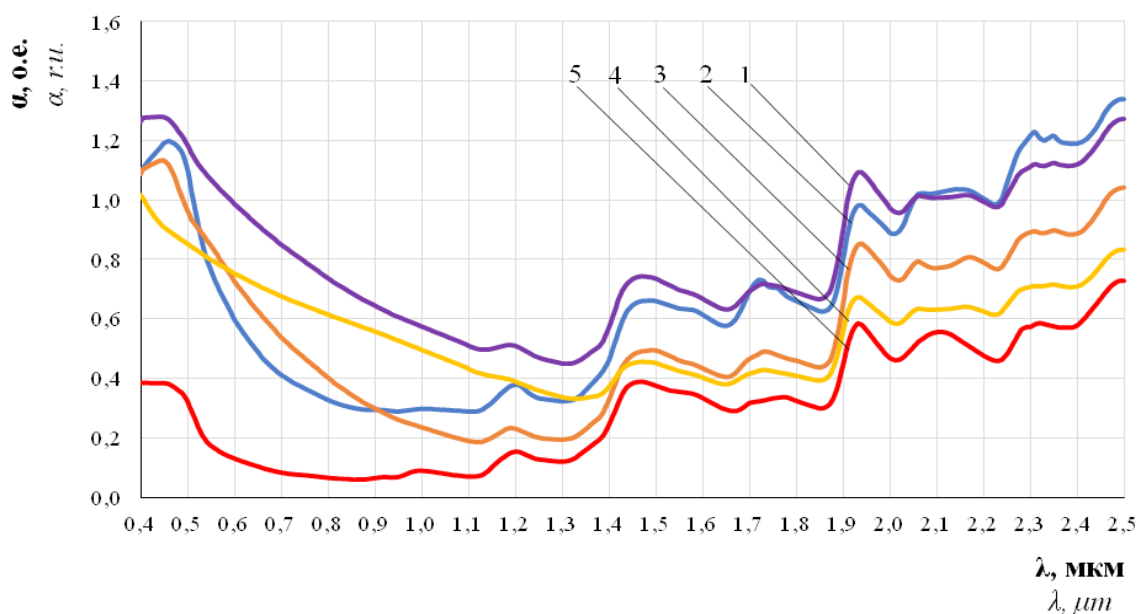


Рис. 2. Спектры поглощения кормовой продукции:

1 – комбикорм четырехкомпонентный молотый; 2 – барда кукурузная; 3 – шрот рапсовый; 4 – жом свекловичный; 5 – кукуруза молотая

Fig. 2. Absorption spectra of feed products:

1 – four-component ground compound feed, 2 – corn stillage, 3 – rapeseed meal, 4 – beet pulp, 5 – ground corn

в видимой и ближней инфракрасной области получен для размолотой пшеницы [11].

В коротковолновой области имеются отличия в спектре свекловичного жома: отсутствуют максимумы на длине волны 0,46 и 1,2 мкм, у молотой кукурузы имеется максимум примерно на 2,11 мкм.

В целом комбикорм имеет наибольшее поглощение во всем исследованном диапазоне, что можно объяснить аддитивным сложением поглощательных свойств всех его составляющих.

В длинноволновой половине спектрального диапазона (1,4...2,5 мкм) наблюдается наибольшее поглощение у комбикорма и барды, затем следуют шрот, жом и кукуруза.

Для всех образцов характеристики $\alpha(\lambda)$ имеют минимум в области 1,0...1,87 мкм, а на краях исследованного спектрального диапазона поглощение увеличивается. Сильные пики и впадины с наибольшим весом являются чувствительными длинами волн для прогнозирования содержания крахмала – такие, как 1210...1222, 1575...1625 и 2333...2356 нм [12]. Некоторые из них соответствуют пикам поглощения, связанным с С-Н растяжением крахмала.

Величина математического ожидания M_λ сильно отличается во всех образцах: наименьшее ее значение наблюдается у свекловичного жома ($M_\lambda = 1433$ нм), затем следуют комбикорм ($M_\lambda = 1497$ нм), рапсовый шрот ($M_\lambda = 1540$ нм), барда ($M_\lambda = 1620$ нм) и кукуруза ($M_\lambda = 1765$ нм). Это связано с расположением кривых $\alpha(\lambda)$ в коротковолновой и длинноволновой областях спектра.

Отметим, что математическое ожидание комбикорма никак не коррелируется с математическими ожиданиями его компонентов при учете их массовой доли и, следовательно, не может быть использовано для контроля состава и качества смешивания. Однако интегральные коэффициенты поглощения в различных диапазонах $\lambda_1... \lambda_2$ (табл. 1), рассчитанные по формуле (1), являются статистически

достоверными и различаются во всех спектральных диапазонах, принадлежащих определенным максимумам (рис. 2).

Полученные данные дают возможность разработать оптическую технологию контроля качества смешивания комбикорма при изготовлении и дальнейшего контроля готового продукта.

Для длинноволновых диапазонов ($\lambda > 1,65$ мкм) коэффициенты поглощения A являются сравнительно близкими у комбикорма и барды. В диапазоне 1,65...2,40 мкм различие составит всего 0,6%.

В результате измерений было оценено влияние фракционного состава компонентов на точность измерения оптических параметров. Различия в подготовке образцов (помол или грануляция) [13] могут повлиять на спектральные характеристики (рис. 3).

Спектры молотого и гранулированного комбикорма качественно одинаковы во всем спектральном диапазоне, но интегральный коэффициент поглощения молотого комбикорма выше на 22%, что объясняется его меньшим отражением по сравнению с гранулированным, где имеется некоторый отражательный «глянец».

Особый интерес представляют результаты сравнения спектров поглощения 4-компонентного комбикорма, клетчатки и 2-компонентного комбикорма (рис. 4).

Ввиду того, что фальсификация комбикормов происходит путем замены энергетически ценного дорогого сырья на более дешевое (например, отруби или шелуху зерновых культур), наибольший интерес представляет спектральная характеристика клетчатки, которая преобладает в подобном дешевом сырье.

На рисунке 4 можно увидеть, что характерные для клетчатки максимумы 1206, 1450, 1820, 1940, 2300 нм и минимумы 1664, 2000, 2242 [12] совпадают с полученными результатами измерения молотого 2-компонентного комбикорма.

Интегральные коэффициенты поглощения четырехкомпонентного комбикорма и его составляющих для различных спектральных диапазонов

Таблица 1

Integral absorption coefficients of four-component compound feed and its components for various spectral ranges

Table 1

Образец Sample	A±ΔA, о.е., для спектрального диапазона, мкм / A±ΔA, r.u., for the spectral range, μm						
	0,40...0,54	1,13...1,22	1,36...1,65	1,65...1,86	1,86...2,02	2,02...2,23	2,23...2,40
Комбикорм / Compound feed	171±1	46±1	195±3	145±2	153±1	212±2	187±2
Барда / Corn stillage	154±1	32±1	172±1	141±1	138±1	214±1	200±1
Шрот / Oil cake (rapeseed meal)	146±1	20±1	125±1	97±1	115±1	166±1	149±1
Жом / Beet pulp	125±2	37±1	120±3	86±5	93±3	133±12	119±8
Кукуруза / Corn	47±8	11±1	95±9	67±5	76±9	109±11	95±10

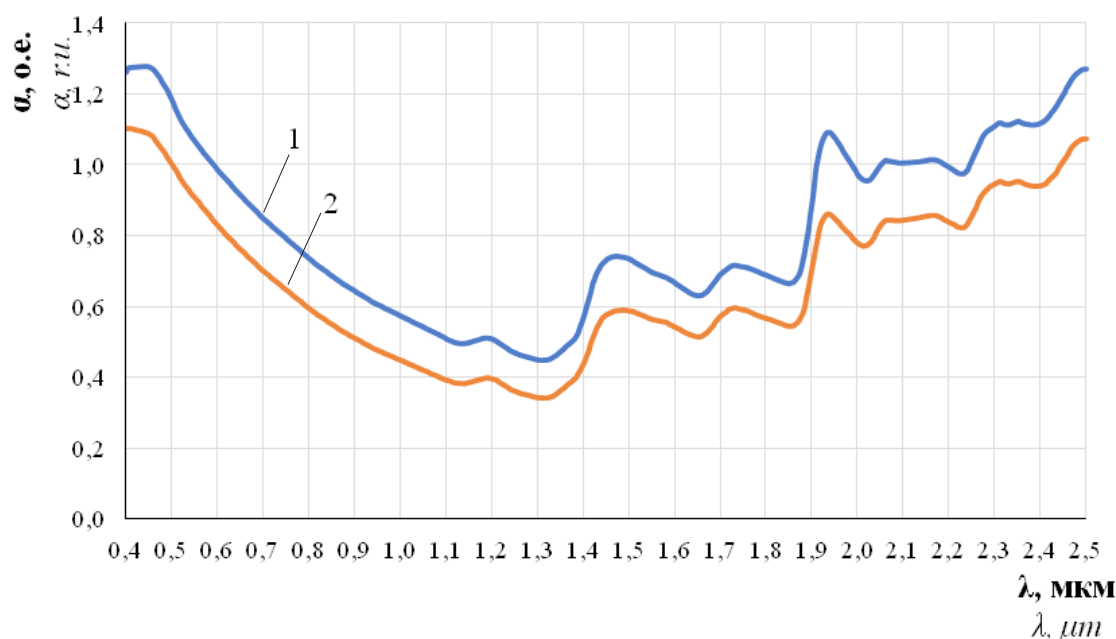


Рис. 3. Спектры поглощения четырехкомпонентного комбикорма:
1 – молотого; 2 – гранулированного

Fig. 3. Absorption spectra of four-component compound feed:
1 – ground; 2 – granulated

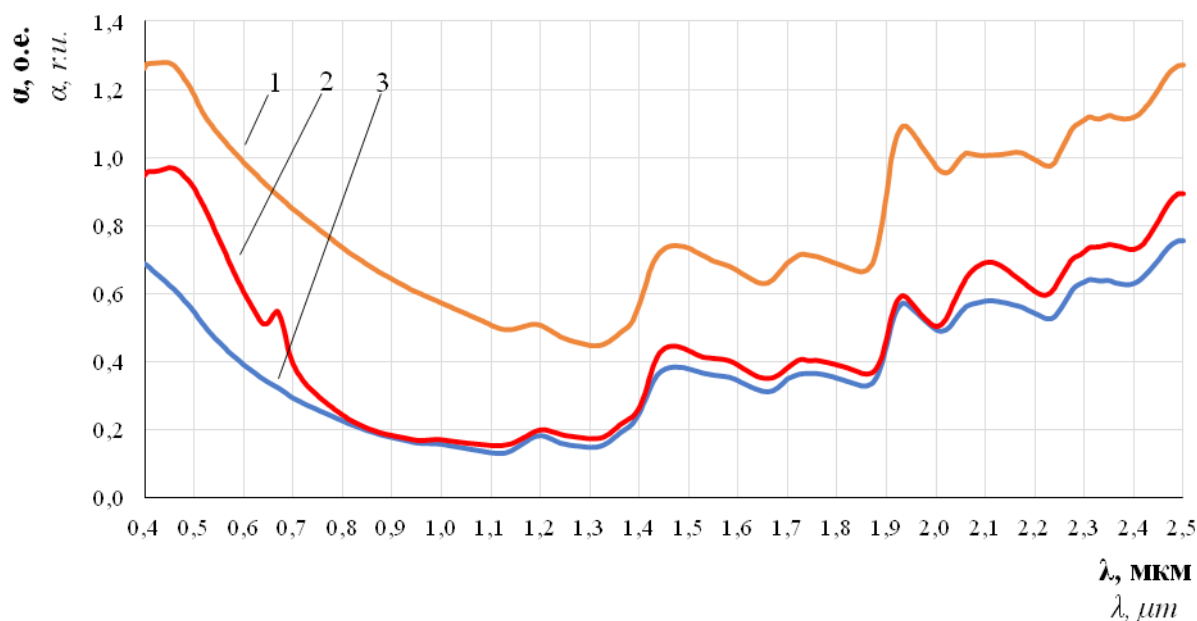


Рис. 4. Спектры поглощения молотого комбикорма и клетчатки:
1 – комбикорм четырехкомпонентный; 2 – клетчатка; 3 – комбикорм двухкомпонентный

Fig. 4. Absorption spectra of ground compound feed and fiber:
1 – four-component compound feed; 2 – fiber; 3 – two-component compound feed

Максимум 1820 нм отсутствует как в чистой клетчатке, так и в образцах комбикорма, а максимум 2300 нм выражен слабо в отличие от соседнего максимума 2310 нм, характерного для липидов. Из данных рисунка 4 следует, что в диапазоне 0,4...0,8 мкм спектры наиболее различаются. В диапазоне 0,8...1,4 мкм спектр клетчатки практически не отличается от спектра 2-компонентного комбикорма.

В более длинноволновых диапазонах отличия более заметны и увеличиваются с увеличением длины волны.

Интегральные коэффициенты поглощения для различных диапазонов $\lambda_1 \dots \lambda_2$ представлены в таблице 2.

Можно сделать вывод о том, что диагностику фальсификации на предмет избыточного содержания

Таблица 2

Интегральный коэффициент поглощения молотого комбикорма и клетчатки для различных спектральных диапазонов

Table 2

Integral absorption coefficients of various types of ground compound feed and fiber for various spectral ranges

Образец Sample	A±ΔA, о.е., для диапазона, мкм / A±ΔA, r.u., for the spectral range, μm			
	0,4...0,8	0,8...1,4	1,4...2,0	2,0...2,5
Комбикорм четырехкомпонентный молотый Four-component compound feed	404±4	330±6	450±7	535±5
Клетчатка / Fiber	255±1	111±4	251±2	347±2
Комбикорм двухкомпонентный молотый Two-component compound feed	168±8	100±5	228±14	301±16

клетчатки необходимо проводить в диапазоне 0,8...1,4 мкм, а диапазон 0,4...0,8 мкм является неинформативным, тем более что в спектре комбикормов полностью отсутствует характерный для клетчатки пик 0,67 мкм.

Потенциальным технологическим эффектом применения метода спектроскопии видимого и ближнего инфракрасного излучения является сокращение временных издержек, связанных с проведением химического анализа комбикорма на предмет соответствия заявленной рецептуре, а также облегчение проведения мероприятий на животноводческом комплексе, связанных с менеджментом кормления и предполагающих корректировку рациона.

Измерения можно проводить как на специализированном лабораторном спектрометре, так и на более дешевых портативных узкоспектральных фотометрах, работающих в определенных (наиболее информативных) диапазонах.

Список источников

1. Дорохов А.С., Бельшклина М.Е. Концепция формирования инновационного агропромышленного соевого кластера в Дальневосточном регионе // Аграрная Россия. 2020. № 3. С. 41-48. <https://doi.org/10.30906/1999-5636-2020-3-41-48>
2. Дорохов А.С., Бельшклина М.Е., Болшева К.К. Производство сои в Российской Федерации: основные тенденции и перспективы развития // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2019. № 3 (47). С. 25-33. EDN: DXORYI
3. 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. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-1-11-18>
4. Nikitin E.A., Belyakov M.V., Efremenko I.Yu., Blagov D.A., Mamedova R.A., Sviridov A.S., Alipichev A.Y. Non-contact assessment of the nutritional value of feed with optical technologies. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2024;26(3):51-57. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-3-51-57>
5. Pavkin D.Yu., Belyakov M.V., Nikitin E.A., Efremenko I.Yu., Golyshkov I.A. Determination of the dependences

Выводы

1. Наибольшее отличие поглощательных свойств отдельных составляющих комбикорма наблюдается либо в коротковолновом диапазоне 0,4...1,2 мкм, либо в диапазоне свыше 1,65 мкм. Спектральные характеристики поглощения $\alpha(\lambda)$ в коротковолновом диапазоне менее системны, что требует выделения более узких спектральных интервалов, например: 0,40...0,54 или 1,13...1,22 мкм.

2. Отличие спектральных поглощающих свойств различных комбикормов наиболее проявляется в коротковолновой области ($\lambda < 1,36$ мкм). Для клетчатки наибольшее различие наблюдается в области менее 800 нм.

3. Найденные информативные спектральные диапазоны могут использоваться при разработке оптических методик и датчиков для экспресс-диагностики качества (соответствия заявленной рецептуре и компонентному составу) концентрированных комбикормов для животноводства.

References

1. Dorokhov A.S., Belyshkina M.E. Concept of forming an innovative agro-industrial soy cluster in the Far Eastern region. *Agrarnaya Rossiya*. 2020;3:41-48. (In Russ.) <https://doi.org/10.30906/1999-5636-2020-3-41-48>
2. Dorokhov A.S., Belyshkina M.E., Bolsheva K.K. Soy production in the Russian Federation: basic trends and development prospects. *Vestnik of Ulyanovsk State Agricultural Academy*. 2019;3(47):25-33. (In Russ.)
3. 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;17(1):11-18. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-1-11-18>
4. Nikitin E.A., Belyakov M.V., Efremenko I.Yu., Blagov D.A., Mamedova R.A., Sviridov A.S., Alipichev A.Y. Non-contact assessment of the nutritional value of feed with optical technologies. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2024;26(3):51-57. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-3-51-57>
5. Pavkin D.Yu., Belyakov M.V., Nikitin E.A., Efremenko I.Yu., Golyshkov I.A. Determination of the dependences of the nutritional value of corn silage and photoluminescent

of the nutritional value of corn silage and photoluminescent properties. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2023;13(18):10444. <https://doi.org/10.3390/app131810444>

6. Grabska J., Beć K.B., Huck C.W. Miniaturized Near-Infrared Spectroscopy – The Ultimate Analytical Tool in Food and Agriculture. *Infrared Spectroscopy*. 2022. <https://doi.org/10.1002/9780470027318.a9790>

7. Yang Z., Han L., Wang C., Li J., Fernandez P., Juan A., Dardenne P., Baeten V. Detection of melamine in soybean meal using near-infrared microscopy imaging with pure component spectra as the evaluation criteria. *Journal of Spectroscopy*. 2016;2016(6). <https://doi.org/10.1155/2016/5868170>

8. Liu X., Han L., Veys P., Baeten V., Jiang X., Dardenne P. An overview of the legislation and light microscopy for detection of processed animal proteins in feeds. *Microscopy Research and Technique*. 2011;74(8):735-743. <https://doi.org/10.1002/jemt.20951>

9. Bec K.B., Grabska J., Huck C.W. Near-infrared spectroscopy in bio-applications. *Molecules*. 2020;25(12):2948. <https://doi.org/10.3390/molecules25122948>

10. Chalmers J.M. Spectroscopy in process analysis (Sheffield Analytical Chemistry), England: Sheffield Academic Press; Boca Raton, FL: CRC Press, 2000. 380 p.

11. Badaro A.T., Morimitsu F.L., Ferreira A.R., Clerici M.T.P.S., Barbin D.F. Identification of fiber added to semolina by near infrared (NIR) spectral techniques. *Food Chemistry*. 2019;289:195-203. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.03.057>

12. Du Z., Tian W., Tilley M., Wang D., Zhang G., Li Y. Quantitative assessment of wheat quality using near-infrared spectroscopy: A comprehensive review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2022;21:2956-3009. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12958>

13. Bao J., Shen Y., Jin L. Determination of thermal and retrogradation properties of rice starch using near-infrared spectroscopy. *Journal of Cereal Science*. 2007;46(1):75-81. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2006.12.002>

Информация об авторах

¹ **Беляков Михаил Владимирович**, д-р техн. наук, главный научный сотрудник; SPIN-код: 2864-9937, AuthorID: 745187; bmw20100@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4371-8042>

² **Никитин Евгений Александрович**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник; SPIN-код: 7453-6947, AuthorID: 960848; evgeniy.nicks@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0918-2990>

³ **Пятченков Денис Сергеевич**, специалист; denis.piat@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5903-6142>

^{1,2,3} Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5

Вклад авторов

М.В. Беляков – определил стратегию проведения исследований и разработал методику проведения исследований, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;

Е.А. Никитин – произвел литературный обзор рукописи и обосновал актуальность, создание черновика рукописи;

Д.С. Пятченков – производил лабораторные измерения и статистическую обработку данных.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат.

Статья поступила 08.08.2024, после рецензирования и доработки 06.09.2024; принята к публикации 23.12.2024.

properties. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2023;13(18):10444. <https://doi.org/10.3390/app131810444>

6. Grabska J., Beć K.B., Huck C.W. Miniaturized Near-Infrared Spectroscopy – The Ultimate Analytical Tool in Food and Agriculture. *Infrared Spectroscopy*. 2022. <https://doi.org/10.1002/9780470027318.a9790>

7. Yang Z., Han L., Wang C., Li J., Fernandez P., Juan A., Dardenne P., Baeten V. Detection of melamine in soybean meal using near-infrared microscopy imaging with pure component spectra as the evaluation criteria. *Journal of Spectroscopy*. 2016;2016(6). <https://doi.org/10.1155/2016/5868170>

8. Liu X., Han L., Veys P., Baeten V., Jiang X., Dardenne P. An overview of the legislation and light microscopy for detection of processed animal proteins in feeds. *Microscopy Research and Technique*. 2011;74(8):735-743. <https://doi.org/10.1002/jemt.20951>

9. Bec K.B., Grabska J., Huck C.W. Near-infrared spectroscopy in bio-applications. *Molecules*. 2020;25(12):2948. <https://doi.org/10.3390/molecules25122948>

10. Chalmers J.M. Spectroscopy in process analysis (Sheffield Analytical Chemistry), England: Sheffield Academic Press; Boca Raton, FL: CRC Press, 2000. 380 p.

11. Badaro A.T., Morimitsu F.L., Ferreira A.R., Clerici M.T.P.S., Barbin D.F. Identification of fiber added to semolina by near infrared (NIR) spectral techniques. *Food Chemistry*. 2019;289:195-203. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.03.057>

12. Du Z., Tian W., Tilley M., Wang D., Zhang G., Li Y. Quantitative assessment of wheat quality using near-infrared spectroscopy: A comprehensive review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2022;21:2956-3009. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12958>

13. Bao J., Shen Y., Jin L. Determination of thermal and retrogradation properties of rice starch using near-infrared spectroscopy. *Journal of Cereal Science*. 2007;46(1):75-81. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2006.12.002>

Author Information

¹ **Mikhail V. Belyakov**, DSc (Eng), Chief Research Engineer; bmw20100@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4371-8042>

² **Evgeniy A. Nikitin**, CSc (Eng), Senior Research Engineer; evgeniy.nicks@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0918-2990>

³ **Denis S. Pyatchenkov**, specialist, denis.piat@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5903-6142>

^{1,2,3} Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 109428, Russian Federation, Moscow, 1st Institute passage, 5

Author Contribution

M.V. Belyakov – conceptualization, methodology, writing – original draft preparation, review and editing of the manuscript;

E.A. Nikitin – literature review, conceptualization, methodology, writing – original draft preparation, review and editing of the manuscript;

D.S. Pyatchenkov – investigation, statistical data curation.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism

Received 08.08.2024; Revised 06.09.2024; Accepted 23.12.2024

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 681.518.3: 004.422.8:621.398

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-75-81>

Алгоритм разработки программного обеспечения беспроводной системы мониторинга температуры сельскохозяйственных объектов

А.В. Вострухин¹, М.А. Мастепаненко², И.Н. Воротников³, Е.А. Вахтина⁴^{1,2,3,4} Ставропольский государственный аграрный университет; г. Ставрополь, Россия¹ avostrukhin@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2310-2339>² mma_26@inbox.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0335-8791>³ vorotn_in@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8402-7803>⁴ eavakhtina@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8066-6659>

Аннотация. При проектировании цифровых систем наиболее сложным и не поддающимся автоматизации является процесс разработки программного обеспечения, который занимает 85...95% от общей трудоемкости. В статье рассматривается пример разработки программного обеспечения для реализации бюджетной беспроводной системы мониторинга температуры объектов АПК с использованием нелицензируемых ISM-диапазонов радиочастот. Используемый алгоритм восходящего программирования позволяет снизить порог входа по приобретению знаний в области структурного программирования. Приведены примеры простого тестирования программных модулей с использованием интегрированной среды разработки IDE Arduino. Созданы экспериментальные образцы передающей и принимающей подсистем, необходимые для разработки, отладки и исследования программного обеспечения. Аппаратное обеспечение реализовано на базе платформы Arduino, приемопередатчиков (трансиверов) NRF24L01+PA+LNA и цифровых датчиков температуры DS18B20. Радиус обмена данными между передающей и принимающей подсистемами в условиях прямой видимости при максимальной мощности передатчика и скорости передачи данных 250 Кбит/с составил 800...900 м. При передаче 8 байт полезных данных, то есть текущей температуры двух датчиков с интервалом в 1 с, средний потребляемый передающей подсистемой ток составил 22 мА.

Ключевые слова: Arduino, микроконтроллер, передающая, подсистема, принимающая, радиоканал, температура

Благодарности. Исследования выполнены в рамках программы поддержки развития научных коллективов Ставропольского государственного аграрного университета, реализуемой при финансовой поддержке Программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

Для цитирования: Вострухин А.В., Мастепаненко М.А., Воротников И.Н., Вахтина Е.А. Алгоритм разработки программного обеспечения беспроводной системы мониторинга температуры сельскохозяйственных объектов // *Агроинженерия*. 2025. Т. 27. № 1. С. 75-81. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-75-81>

ORIGINAL ARTICLE

Algorithm of software development for a wireless system monitoring the temperature of agricultural premises

A.V. Vostrukhin¹, M.A. Mastepanenko², I.N. Vorotnikov³, E.A. Vakhtina⁴^{1,2,3,4} Stavropol State Agrarian University; Stavropol, Russia¹ avostrukhin@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2310-2339>² mma_26@inbox.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0335-8791>³ vorotn_in@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8402-7803>⁴ eavakhtina@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8066-6659>

Abstract. The most complex and impossible to automate process in the digital system designing is software development, which takes up 85 to 95% of the total labor intensity. The article discussed the development of software for implementing a low-cost wireless temperature monitoring system using unlicensed ISM ("industrial, scientific and medical") radio frequency bands. The proposal is to use a bottom-up programming algorithm, which reduces the entry threshold for acquiring knowledge in the field of structured programming. The authors provide examples of simple testing of software modules using the Arduino IDE. The authors have developed experimental samples of the transmitting and receiving subsystems necessary for software development, debugging and research. The hardware is based on the Arduino platform, NRF24L01+PA+LNA transceivers and DS18B20 digital

temperature sensors. The data exchange radius between the transmitting and receiving subsystems in line-of-sight conditions with a maximum transmitter power and a data transfer rate of 250 Kbit/s was between 800 and 900 m. When transmitting eight bytes of useful data, i.e. the current temperature of two sensors with an interval of one second, the average current consumed by the transmitting subsystem was 22 mA.

Keywords: Arduino, microcontroller, transmitting, subsystem, receiving, radio channel, temperature

Acknowledgments: The research was carried out within the framework of the program to support the development of research teams of Stavropol State Agrarian University, implemented with the financial support of the Strategic Academic Leadership Program “Priority-2030”.

For citation: Vostrukhin A.V., Mastepanenko M.A., Vorotnikov I.N., Vakhtina E.A. Algorithm of software development for a wireless system monitoring the temperature of agricultural premises. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(1):75-81 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-75-81>

Введение

Использование искусственного интеллекта (AI) и интернета вещей (IoT) в сельскохозяйственных технологиях повышает эффективность сельского хозяйства [1]. При этом возникают проблемы в поисках экспертов и профессионалов с цифровыми компетенциями по внедрению AI и IoT в сельское хозяйство, а также эксплуатации новых технологических операций с их использованием [2]. Системы AI и IoT работают под управлением программного обеспечения (ПО). Умения и навыки программирования – актуальная составляющая инженерной деятельности, о чем писал профессор Оксфордского университета Ч.А.Р. Хоар: «...программирование... подобно открытию законов Ньютона и дифференциального исчисления...» [3]. В докладе «Программирование – вторая грамотность» академик А.П. Ершов подчеркивал: «...даже обучение, то есть приобретение знаний или, скорее, способности что-то сделать, – это программирование...» [4].

Проблема заключается в отсутствии оптимизированных алгоритмов разработки ПО для систем реального времени, которые сложнее систем виртуального времени, так как содержат модули обработки информации, поступающей от датчиков.

В сельском хозяйстве часто требуется непрерывный контроль температуры. Измерение температуры почвы на разных глубинах необходимо для принятия правильных агротехнических решений, а также для корректировки температурной погрешности, возникающей при измерении влажности почвы диэлектрическим методом, основанном на использовании зависимости диэлектрической проницаемости почвы от количества находящейся в ней воды. В работе [5] приводится описание пятиканального скважинного влагомера почвы, в котором температура измеряется на глубине 10, 20, 30, 50 и 100 см от поверхности почвы. Известны почвенные станции для мониторинга температуры, влажности и засоленности почвы

фирмы Sentek Technologies¹, в которых через каждые 10 см измеряется температура почвы до глубины 120 см. Известны беспроводные системы мониторинга (БСМ), построенные с использованием БПЛА для сбора информации о состоянии почвы, в том числе температуры [6].

Цель исследований: разработать алгоритм проектирования программного обеспечения подсистемы нижнего уровня структуры интернета вещей на примере БСМ температуры сельскохозяйственных объектов, позволяющий снизить сложность и трудоемкость процесса ее разработки.

Материалы и методы

Использовались методы проектирования программируемых систем реального времени (встраиваемых систем), в том числе модульного программирования в интегрированной среде разработки (IDE) Arduino, и осциллографические методы исследования программного и аппаратного обеспечения.

В статье рассматривается алгоритм разработки ПО для беспроводной системы мониторинга, которая может быть применена в системах контроля температуры объектов АПК без подключения к Интернету. Максимальный радиус действия экспериментального образца БСМ в условиях прямой видимости составил 900 м.

В рассматриваемой БСМ использовали экспериментальные образцы (рис. 1) передающей, построенной на Arduino Uno (рис. 1, слева), и принимающей – на Arduino Nano (рис. 1, справа), подсистем, разработанные ранее для мониторинга влажности и температуры почвы [7, 8]. Между этими подсистемами находится радиомодуль NRF24L01+PA+LNA без антенны.

Разработка ПО выполнена в интегрированной среде IDE Arduino (версия 1.8.15), которая доступна

¹ Датчики почвенных данных. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://sentektechnologies.com/products/soil-data-probes/> (дата обращения: 01.06.2024).

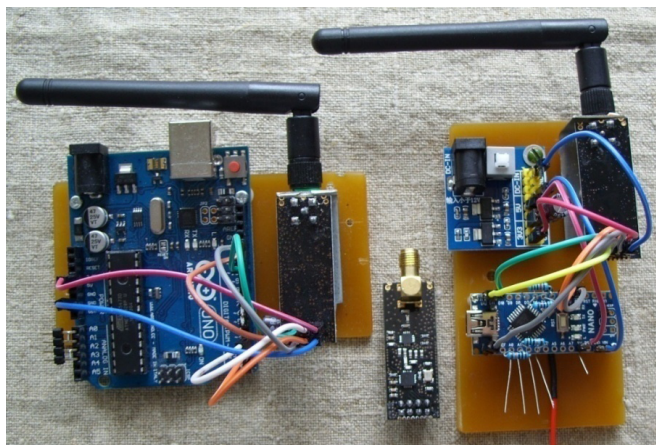


Рис. 1. Принимающая и передающая подсистемы беспроводной системы мониторинга влажности и температуры почвы

Fig. 1. Receiving and transmitting subsystems of a wireless soil moisture and temperature monitoring system

для скачивания с сайта разработчика². Руководство по разработке систем измерения температуры на основе платформы Arduino и датчика DS18B20 приведено в информационном ресурсе³.

ПО передающей подсистемы реализует три функции: измерение температуры цифровых датчиков, вывод на монитор измеряемой температуры и передача данных о температуре в радиомодуль.

Результаты и их обсуждение

Анализ технологий беспроводной передачи данных от автономных датчиков и возможностей их использования инженерами АПК показал, что для создания бюджетных БСМ в большей степени подходят радиомодули с использованием нелицензируемых ISM («industrial, scientific and medical», «промышленный, научный и медицинский») диапазонов радиочастот. Выполненный в работе [9] анализ БСМ показал, что лучшим вариантом для построения бюджетных БСМ является их реализация на платформе Arduino. В работе [10] рассматривается система, в которой микроконтроллерное устройство Arduino Uno совместно с инфракрасным датчиком положения позволяет считывать и вычислять частоту вращения коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания. В работе [11] отражены выполненные исследования, которые показали, что радиомодули

NRF24L01+PA+LNA⁴ могут быть использованы для решения достаточно сложных задач. Таким образом, свободно доступные инструменты и средства платформы Arduino используются как для реализации проектов научно-исследовательского характера [12], так и для практической цифровизации объектов сельского хозяйства [13].

Рассмотрим алгоритм разработки ПО для БСМ – например, температуры зерна при его хранении. БСМ состоит из двух систем: передающей и принимающей. Передающая подсистема (рис. 2) содержит несколько цифровых датчиков температуры DS18B20, размещенных в объеме зерна, хранимого насыпью или в силосе. Датчики температуры S1...Sn подключены к микроконтроллерному устройству Arduino Nano (MCU), которое отправляет на радиомодуль RF (NRF24L01+PA+LNA) данные, считываемые с этих датчиков. Передающая подсистема находится в зернохранилище и может быть запитана от сети 220 В с использованием стандартного источника питания с выходным напряжением 6...12 В постоянного тока.

Принимающая подсистема БСМ устроена аналогично передающей, только без датчиков, и подключена к компьютеру через USB-интерфейс. Принимающая подсистема реализована на Arduino Uno, которое снабжено понижающим до 3.3 В стабилизатором напряжения, обеспечивающим необходимый ток для питания радиомодуля RF.

Предлагаем алгоритм, позволяющий разделить разрабатываемое ПО на отдельные модули для их анализа и синтеза. Рассмотрим алгоритм

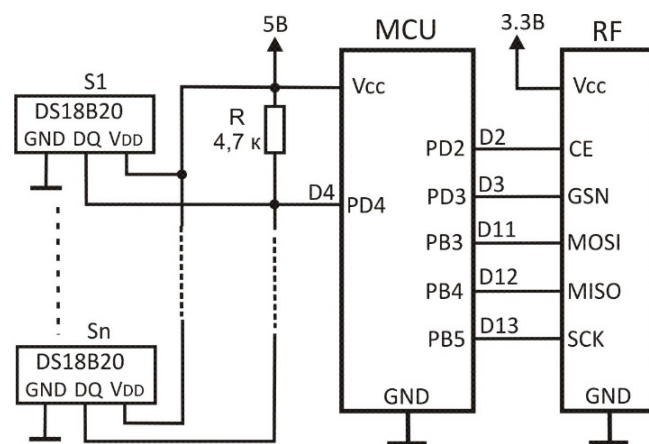


Рис. 2. Схема передающей подсистемы беспроводной системы мониторинга температуры

Fig. 2. Structural diagram of the transmitting subsystem for a wireless temperature monitoring system

² Программное обеспечение. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.arduino.cc/en/software/OldSoftwareReleases> (дата обращения: 01.06.2024).

³ Полное руководство по DS18B20 цифровых датчиков температуры с помощью Arduino. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.makerguides.com/ds18b20-arduino-tutorial/> (дата обращения: 01.06.2024).

⁴ Радиомодуль NRF24L01+/PA+LNA 2.4G (Trema-модуль V2.0). [Электронный ресурс]. URL: <https://wiki.iarduino.ru/page/NRF24L01-trema/> (дата обращения: 01.06.2024).

разработки ПО, то есть последовательность шагов от модуля к модулю для БСМ, состоящей только из двух датчиков температуры DS18B20.

Шаг 1. Разработка модуля ПО вывода на монитор констант типа float, введенных пользователем в программу для ее отладки.

На рисунке 3 представлен модуль, позволяющий отладить вывод на монитор констант $T1 = 11.01$ и $T2 = 22.02$, введенных для имитации температуры, соответственно, первого и второго датчиков. Введенные в программу массивы `massiv [0]` и `massiv [1]` будут использованы в следующих модулях для передачи по радиоканалу данных о температуре. Модуль реализует функцию, позволяющую контролировать передаваемые данные.

Для хранения каждой константы типа float требуется по 4 байта. Массив (строка 1) предназначен для хранения 8 байт. Задержка в 1000 мс (строка 8) необходима для ожидания, когда преобразования в датчиках будут выполнены, так как на преобразование с разрешающей способностью в 0,065 градуса (12 бит) датчик затрачивает 750 мс. Вывод на монитор введенных констант с интервалом в 980 мс показан на рисунке 4.

Шаг 2. Разработка программного кода для измерения температуры и вывода ее значений на монитор.

К отлаженному коду для работы с датчиками DS18B20 (рис. 5) необходимо подключить библиотеку `Dallas Temperature.h` (строка 1). В строках 5 и 6 переменным «`sensor1`» и «`sensor2`» присвоены 64-битные адреса. Строки 16 и 18 объединяют код модуля, приведенного на рисунке 3, в строках 10-12 и 14-16.

На рисунке 6 показан вывод на монитор текущего времени и температуры первого ($T1$) и второго ($T2$) датчиков, расположенных на расстоянии 3 мм друг от друга в воздушной среде.

Шаг 3. Разработка программного кода для передачи по радиоканалу констант, введенных в программу для ее отладки (рис. 7).

Для питания передающей подсистемы использован понижающий преобразователь DC-DC до 3.3 В и 5 В, построенный на двух интегральных стабилизаторах AMS1117 (рис. 8). Модуль размером 45×45 мм имеет входное напряжение от 6 до 12 В, максимальный ток нагрузки 800 мА на канал. На плате установлена кнопка включения, гнездо входного напряжения под штекер – 5.5×2.1 мм.

На рисунке 9 представлена осциллограмма напряжения, измеряемого на резисторе сопротивлением 1 Ом, включенном последовательно в цепь питания передающей подсистемы (на рисунке 2 этот резистор не показан). При напряжении

```
1 float massiv[8]; //Объявить массив для хранения 8 байт данных.
2 void setup()
3 {
4   Serial.begin(9600);
5 }
6 void loop()
7 {
8   delay(1000); //Задержка 1000 мс.
9   massiv[0] = 11.01; //Записать в массив число, имитирующее
10  Serial.print("T1 = "); //температуру первого датчика и
11  Serial.print(massiv[0]); //вывести его на монитор.
12  Serial.print("; ");
13  massiv[1] = 22.02; //Записать в массив число, имитирующее
14  Serial.print("T2 = "); //температуру второго датчика и
15  Serial.print(massiv[1]); //вывести его на монитор.
16  Serial.println(";");
17 }
```

Рис. 3. Модуль ПО вывода на монитор констант, имитирующих значения температуры первого и второго датчиков

Fig. 3. Software module for outputting constants simulating the temperature values of the first and second sensors to the monitor

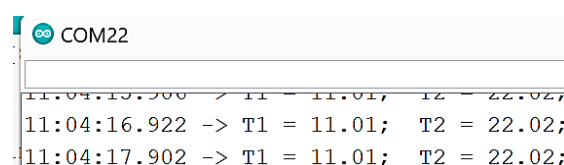


Рис. 4. Вывод на монитор времени и констант, имитирующих температуры первого ($T1$) и второго ($T2$) датчиков

Fig. 4. Output to the monitor of time and constants simulating temperatures of the first ($T1$) and second ($T2$) sensors

```

1 #include <DallasTemperature.h> //Подключить библиотеку для работы с датчиками
2 float massiv[8];
3 OneWire oneWire(4); //В OneWire 4й вывод Arduino, к которому подключена шина OneWire
4 DallasTemperature ds(&oneWire); //Передать в DallasTemperature номер вывода OneWire
5 DeviceAddress sensor1 = {0x28, 0x2E, 0x42, 0xAB, 0x06, 0x00, 0x00, 0x3D}; //Адрес 1
6 DeviceAddress sensor2 = {0x28, 0xFF, 0xC2, 0x9E, 0x66, 0x14, 0x03, 0x5C}; //Адрес 2
7 void setup()
8 {
9     Serial.begin(9600);
10 }
11 void loop()
12 {
13     ds.requestTemperatures(); //Запрос всем датчикам на измерение температуры
14     delay(1000);
15     massiv[0] = (ds.getTempC(sensor1)); //Считать в massiv[0] температуру датчика 1
16     Serial.print("T1 = "); Serial.print(massiv[0]); Serial.print("; ");
17     massiv[1] = (ds.getTempC(sensor2)); //Считать в massiv[1] температуру датчика 2
18     Serial.print("T2 = "); Serial.print(massiv[1]); Serial.println(";");
19 }

```

Рис. 5. Программный код для отладки модуля измерения температуры и вывода ее значений на монитор

Fig. 5. Code for debugging the temperature measurement module and displaying its values on the monitor

на резисторе $V_{max} = 179$ mV, потребляемый передающей подсистемой ток – 179 mA в течение времени 1.38 мс (+Width = 1.38 ms). Средний ток, потребляемый за период 42.1 мс – (Period = 42.1 ms), 24.2 mA – ($V_{mean} = 24.2$ mV). Экспериментальный метод по определению значения тока, потребляемого передающей подсистемой, необходим для расчетов времени ее работы в автономном режиме от одного комплекта батарей и решения задач минимизации энергопотребления.

В работе [14] предложен протокол, позволяющий обеспечить энергосбережение при передаче

```

19:47:52.570 -> T1 = 24.62; T2 = 24.50;
19:47:54.261 -> T1 = 24.62; T2 = 24.50;
19:47:55.985 -> T1 = 24.56; T2 = 24.50;

```

Рис. 6. Вывод на монитор текущего времени и температуры первого (T1) и второго (T2) датчиков

Fig. 6. Displaying the current time and temperature of the first (T1) and second (T2) sensors on the monitor

```

1 #include <SPI.h> //Подключить библиотеку для работы с шиной SPI.
2 #include <nRF24L01.h> //Подключить файл настроек из библиотеки RF24.
3 #include <RF24.h> //Подключить библиотеку для работы с модулем nRF24L01.
4 RF24 radio(2, 3); //Выводы Arduino, к которым подключены выводы CE, CSN nRF24L01.
5 float massiv[8];
6 void setup()
7 { radio.begin (); //Инициализировать работу модуля nRF24L01.
8   radio.setChannel (25); //Задать канал передачи данных (от 0 до 125).
9   radio.setDataRate (RF24_250KBPS); //Задать скорость передачи данных 250 Кбит/с.
10  radio.setPALevel (RF24_PA_MAX); //Задать максимальную мощность передатчика.
11  radio.openWritingPipe (0xAABBCCDD11LL); //Адрес приемника, которому передавать.
12 }
13 void loop()
14 {
15     delay(1000);
16     massiv[0] = 11.01; //Записать в первый массив константу.
17     massiv[1] = 22.02; //Записать во второй массив константу.
18     radio.write(massiv, 8); //Передать 2 массива по 4 байта, всего 8 байт
19 }

```

Рис. 7. Модуль отладки для передачи констант, имитирующих температуру

Fig. 7. Debug module for passing constants simulating temperature

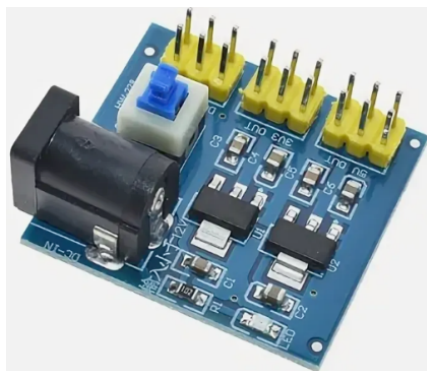


Рис. 8. Модуль питания с выходным напряжением 5 В и 3.3 В

Fig. 8. Power module with 5V and 3.3V output voltage

данных по радиоканалу, а следовательно, продлить срок службы автономных источников питания для беспроводных датчиков. Данный протокол может быть использован в качестве альтернативного варианта управления передачей данных по радиоканалу.

Выводы

Экспериментальные исследования разработанной БСМ показали, что предлагаемый алгоритм позволяет выполнить разделение ее ПО на отдельные модули для анализа и синтеза аппаратного и программного

Список источников

1. Adli H.K., Remli M.A., Wan Salihin Wong K.N.S., Ismail N.A., González-Briones A., Corchado J.M., Mohamad M.S. Recent Advancements and Challenges of AIoT Application in Smart Agriculture: A Review. *Sensors*. 2023;23(7). <https://doi.org/10.3390/s23073752>
2. Водяников В.Т., Эдер А.В. Цифровизация АПК: оценка и перспективы внедрения в аграрном секторе экономики страны // *Агроинженерия*. 2024. Т. 26, № 2. С. 49-56. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-2-49-56>
3. Хоар Ч.А.Р. Программирование как инженерная профессия // *Микропроцессорные средства и системы*. 1984. № 4. С. 53-60. *Микропроцессорные средства и системы*, 1984, № 04.djvu
4. Ершов А.П. Программирование – вторая грамотность // *Проблемы информатики*. 2015. № 4 (29). С. 71-85. EDN: VSQJHN
5. Блохина С.Ю., Блохин Ю.И. Интеллектуальное земледелие на основе Интернета вещей // *Земледелие*. 2020. № 7. С. 7-15. EDN: FPNLYB
6. Holtorf L., Titov I., Daschner F., Gerken M. UAV-Based Wireless Data Collection from Underground Sensor Nodes for Precision Agriculture. *AgriEngineering*. 2023;5(1):338-354. <https://doi.org/10.3390/agriengineering5010022>
7. Многоканальный микроконтроллерный измерительный преобразователь для зондов систем мониторинга влажности почвы емкостными датчиками: Патент RU2818484 C1, МПК G01R27/26(2006.01) / А.В. Вострухин, М.А. Мастепаненко, И.Н. Воротников, Е.А. Вахтина; заявл. 18.12.2023; опубл. 02.05.2024, Бюл. № 13. EDN: RVENHO
8. Vostrukhin A., Mastepanenko M., Vorotnikov I., Vakhtina E. Multichannel measuring converter for monitoring soil moisture with capacitive sensors. *Innovations in Sustainable Agricultural Systems*. 2024;2:12-20. https://doi.org/10.1007/978-3-031-72556-2_2

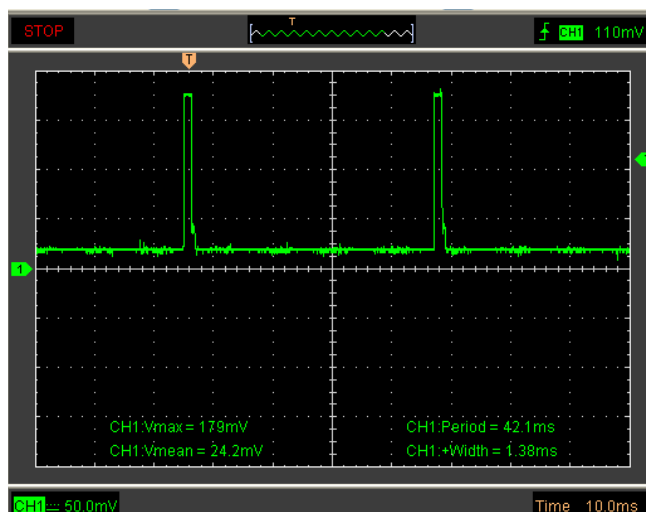


Рис. 9. Осциллограмма напряжения на резисторе, включенном последовательно во входную цепь модуля питания передающей подсистемы

Fig. 9. Voltage oscillogram across a resistor turned on serially into the input circuit of the power module of the transmitting subsystem

обеспечения. Это необходимо для успешного освоения процессов изучения, исследования и разработки систем реального времени, в том числе БСМ температуры сельскохозяйственных объектов.

References

1. Adli H.K., Remli M.A., Wan Salihin Wong K.N.S., Ismail N.A., González-Briones A., Corchado J.M., Mohamad M.S. Recent advancements and challenges of aiot application in smart agriculture: a review. *Sensors*. 2023;23(7). <https://doi.org/10.3390/s23073752>
2. Vodyannikov V.T., Eder A.V. Assessment and prospects for the digitalization of the agricultural sector of the Russian Economy. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2024;26(2):49-56. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-2-49-56>
3. Hoare C.A.R. Programming is an engineering profession. *Microprocessor-based tools and systems*. 1984;4:53-60. *Microprocessor Tools and Systems*, 1984, № 04.djvu (date of application: 05.01.2025). (In Russ.)
4. Ershov A.P. Programming is the second literacy. *Problemy Informatiki*. 2015;4:71-85. (In Russ.)
5. Blokhina S.Yu., Blokhin Yu.I. A smart farming based on the Internet of things. *Zemledelie*. 2020;7:7-13. (In Russ.)
6. Holtorf L., Titov I., Daschner F., Gerken M. UAV-Based Wireless Data Collection from Underground Sensor Nodes for Precision Agriculture. *AgriEngineering*. 2023;5(1):338-354. <https://doi.org/10.3390/agriengineering5010022>
7. Vostrukhin A.V., Mastepanenko M.A., Vorotnikov I.N., Vakhtina E.A. Multichannel microcontroller measuring transducer for probes of soil moisture monitoring systems with capacitive sensors: Patent No. 2818484, IPC G01R27/26(2006.01), 2024. (In Russ.)
8. Vostrukhin A., Mastepanenko M., Vorotnikov I., Vakhtina E. Multichannel measuring converter for monitoring soil moisture with capacitive sensors. *Innovations in Sustainable Agricultural Systems*. 2024;2:12-20. https://doi.org/10.1007/978-3-031-72556-2_2
9. Vecherkov V.V., Abduraimov S.R., Dunaeva E.A. Development of a complex agrometeo station based on Arduino microcontroller. *Transactions of Tavrida Agricultural Science*. 2023;33:105-114. (In Russ.)

9. Вечерков В.В., Абдураимов С.Р., Дунаева Е.А. Разработка комплексной агрометеостанции, основанной на микроконтроллере Arduino // Известия сельскохозяйственной науки Тавриды. 2023. № 33 (196). С. 105-114. EDN: NVOBPM

10. Катаев Ю.В., Костомахин М.Н., Пестряков Е.В., Петрищев Н.А., Саяпин А.С. Дистанционный контроль частоты вращения коленчатого вала двигателя трактора с использованием алгоритма машинного обучения // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 5. С. 34-39. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-5-34-39>

11. Родионов И.А., Елохин А.П., Рахматулин А.Б., Улин С.Е., Маджидов А.И., Шустов А.Е. Особенности передачи информации по радиоканалу в режиме реального времени при использовании беспилотного дозиметрического комплекса // Глобальная ядерная безопасность. 2023. № 1 (46). С. 5-13 <https://doi.org/10.26583/gns-2023-01-01>

12. Vostrukhin A., Vakhtina E., Bondar S., Tomashik L. Microcontroller metering converter of capacitance with voltage-controlled RC generator. *Engineering for Rural Development*. 2018;17:877-882. <https://doi.org/10.22616/ERDev2018.17.N055>

13. Vostrukhin A., Vakhtina E. Temperature sensor resistance conversion to binary code using pulse width modulation. *Engineering for Rural Development*. 2019;18:1269-1274. <https://doi.org/10.22616/ERDev2019.18.N037>

14. Вострухин А.В., Мастепаненко М.А., Вахтина Е.А. Энергосберегающий асинхронный интерфейс для беспроводных датчиков // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2023. № 63. С. 92-102. EDN: MCGNMX

Информация об авторах

¹ Вострухин Александр Витальевич, канд. техн. наук, доцент, научный сотрудник кафедры электротехники, автоматизации и метрологии; SPIN-код: 7414-7478, AuthorID: 291788; <https://orcid.org/0000-0002-2310-2339>, avostrukhin@yandex.ru

² Мастепаненко Максим Алексеевич, канд. техн. наук, доцент, декан электроэнергетического факультета; SPIN-код: 1676-2740, AuthorID: 731041; <https://orcid.org/0000-0002-0335-8791>, mma_26@inbox.ru

³ Воротников Игорь Николаевич, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой электротехники, автоматизации и метрологии; SPIN-код: 6399-5710, AuthorID: 620972; <https://orcid.org/0000-0002-8402-7803>, vorotn_in@mail.ru

⁴ Вахтина Елена Артуровна, канд. пед. наук, доцент кафедры электротехники, автоматизации и метрологии; SPIN-код: 1467-8083, AuthorID: 546927; <https://orcid.org/0000-0002-8066-6659>, eavakhtina@yandex.ru

^{1,2,3,4} Ставропольский государственный аграрный университет; 355017, Российская Федерация, г. Ставрополь, пер. Зоотехнический, 12

Вклад авторов

А.В. Вострухин – концептуализация построения программного и аппаратного обеспечения беспроводной системы мониторинга физических величин, характеризующих состояние сельскохозяйственных объектов;

М.А. Мастепаненко – оптимизация построения программного и аппаратного обеспечения беспроводной системы мониторинга; И.Н. Воротников – тестирование и отладка модулей программного обеспечения беспроводной системы мониторинга; Е.А. Вахтина – построение структуры и корректировка рукописи с позиций дидактического проектирования встраиваемых систем на базе микроконтроллеров.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 02.06.2024, после рецензирования и доработки 28.09.2024; принята к публикации 26.11.2024

10. Kataev Yu.V., Kostomakhin M.N., Pestryakov E.V., Petrishchev N.A., Sayapin A.S. Remote control of the crankshaft speed of a tractor engine using a machine learning algorithm. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2023;25(5):34-39. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-5-34-39>

11. Rodionov I.A., Elokhin A.P., Rakhmatulin A.B., Ulin S.E., Majidov A.I., Shustov A.E. Information transmission features of live mode radio channel when using unmanned dosimetry complex. *Global Nuclear Safety*. 2023;(1):5-13. (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2023-01-01>

12. Vostrukhin A., Vakhtina E., Bondar S., Tomashik L. Microcontroller metering converter of capacitance with voltage-controlled RC generator. *Engineering for Rural Development*. 2018;17:877-882. <https://doi.org/10.22616/ERDev2018.17.N055>

13. Vostrukhin A., Vakhtina E. Temperature sensor resistance conversion to binary code using pulse width modulation. *Engineering for Rural Development*. 2019;18:1269-1274. <https://doi.org/10.22616/ERDev2019.18.N037>

14. Vostrukhin A.V., Mastepanenko M.A., Vakhtina E.A. Power-saving asynchronous interface for wireless sensors. *Tomsk State University Journal of Control and Computer Science*. 2023;63:92-102. (In Russ.)

Author Information

¹ Aleksandr V. Vostrukhin, CSc (Eng), Associate Professor, Researcher of the Department of Electrical Engineering, Automation and Metrology; <https://orcid.org/0000-0002-2310-2339>, avostrukhin@yandex.ru

² Maksim A. Mastepanenko, CSc (Eng), Associate Professor, Dean of Electrical Power Engineering Faculty; <https://orcid.org/0000-0002-0335-8791>, mma_26@inbox.ru

³ Igor N. Vorotnikov, CSc (Eng), Associate Professor, Head of the Department of Electrical Engineering, Automation and Metrology; <https://orcid.org/0000-0002-8402-7803>, vorotn_in@mail.ru

⁴ Elena A. Vakhtina, CSc (Ed), Associate Professor, the Department of Electrical Engineering, Automation and Metrology; <https://orcid.org/0000-0002-8066-6659>, eavakhtina@yandex.ru

^{1,2,3,4} Stavropol State Agrarian University; 12 Zootekhnicheskii Lane, Stavropol, 355017, Russian Federation

Authors Contribution

A.V. Vostrukhin – conceptualization, software and hardware resources;

M.A. Mastepanenko – formal analysis, software and hardware resources;

I.N. Vorotnikov – software, investigation, validation;

E.A. Vakhtina – writing – original draft preparation, review and editing of the manuscript.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest and are responsible for plagiarism

Received 02.06.2024; Revised 28.09.2024; Accepted 26.11.2024

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 539.3

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-82-88>

Совершенствование конструкции микродирижабля сельскохозяйственного назначения

Д.В. Белов¹, Н.Е. Кабдин², С.А. Андреев³^{1,2,3} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; Москва, Россия¹ dmitri.belov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0009-0005-8015-2067>² energo-nek@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4104-4187>³ energo-andreev@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8608-9904>

Аннотация. Беспилотный летательный аппарат эффективен при мониторинге возделываемых территорий, мероприятиях по защите растений и наблюдениях за животными. В отличие от других летательных аппаратов беспилотный микродирижабль может совершать длительный полет при незначительном потреблении энергии. Недостатками используемых микродирижаблей являются громоздкость конструкции, зависимость подъемной силы от режимов работы двигателя, невысокая скорость снижения. Исследования проведены с целью совершенствования конструкции микродирижабля, заключающегося в снижении массы системы создания подъемной силы, повышении энергетической эффективности дирижабля и надежности солнечных батарей, обеспечении возможности вертикального маневрирования за счет энергосберегающего повышения и понижения температуры гелия, исключении зависимости работоспособности системы создания подъемной силы от режима работы движителя горизонтального перемещения, а также в снижении инерционности процесса создания подъемной силы. Предложено расположить фотоэлектрические элементы на внешней поверхности оболочки над экваториальной линией микродирижабля и использовать их с аккумуляторами в качестве элементов системы создания подъемной силы. Представлен алгоритм автоматического управления энергетическими потоками на микродирижабле. Предложено разместить термоэлектрические преобразователи, обеспечивающие нагрев или охлаждение гелия на внутренней поверхности оболочки. Рассмотрен принцип реверсирования полярности питаемого напряжения в соответствии с командой оператора и температурой между фотоэлектрическими элементами и термоэлектрическими преобразователями. Сделан вывод о возможности предотвращения перегрева фотоэлектрических элементов при высокой освещенности и значительной силе потребляемого тока за счет эффекта переноса тепловой энергии термоэлектрическими преобразователями. Энергосберегающий эффект достигается использованием электроэнергии исключительно на привод движителя горизонтального перемещения и на обеспечение переноса тепловой энергии термоэлектрическими преобразователями.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, микродирижабль, совершенствование конструкции микродирижабля, вертикальное маневрирование, нагрев или охлаждение гелия, фотоэлектрические элементы, термоэлектрические преобразователи

Для цитирования: Белов Д.В., Кабдин Н.Е., Андреев С.А. Совершенствование конструкции микродирижабля сельскохозяйственного назначения // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 1. С. 82-88. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-82-88>

ORIGINAL ARTICLE

Improving the design of micro-airship of an agricultural purpose

D.V. Belov¹, N.E. Kabdin², S.A. Andreev³^{1,2,3} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia¹ dmitri.belov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0009-0005-8015-2067>² energo-nek@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4104-4187>³ energo-andreev@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8608-9904>

Abstract. The unmanned aerial vehicle is effective in monitoring cultivated areas, plant protection activities and animal observation. In contrast to other aircrafts, an unmanned micro-airship can perform a long flight with low energy consumption. The disadvantages of micro-airships include their bulky design, dependence of lift force on the engine operation modes, and small descent speed. The authors conducted research to improve the design

of a micro-airship. The list of measures includes reducing the mass of the lift generation system, increasing the energy efficiency of the airship and the reliability of solar batteries, ensuring vertical maneuvering through increasing energy-saving and decreasing in temperature of helium, excluding the dependence of the operability of the lift generation system on the operation mode of the horizontal movement engine, as well as reducing the inertia of lift generation. It is proposed to place photovoltaic elements on the outer surface of the shell above the equatorial line of the micro-airship and use them with accumulators as elements of the system of creating the lifting force. The article presents an algorithm for automatic control of energy flows on the micro-airship. The authors' idea is to place thermoelectric converters providing heating or cooling of helium on the inner surface of the shell. The article also highlights the principle of reversing the polarity of the supplied voltage in accordance with the operator's instruction and the temperature between photovoltaic elements and thermoelectric converters. The authors have found that it is possible to prevent overheating of photovoltaic elements at high illumination and significant current consumption due to the effect of thermal energy transfer by thermoelectric converters. The energy-saving effect is achieved by using electric power exclusively to drive the horizontal motion propeller and to ensure the transfer of thermal energy by thermoelectric converters.

Keywords: unmanned aerial vehicle, micro airship, micro airship design improvement, vertical maneuvering, heating or cooling of helium, photovoltaic elements, thermoelectric converters

For citation: Belov D.V., Kabdin N.E., Andreev S.A. Improving the design of micro-airship of an agricultural purpose. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(1):82-88 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-82-88>

Введение

Эффективность сельскохозяйственных технологических процессов, связанных с мониторингом возделываемых территорий, мероприятиями по защите растений, наблюдениями за животными [1], можно существенно повысить за счет использования беспилотной авиации. В качестве средств беспилотной авиации используют многодвигательные коптеры, а в последнее время – беспилотные микродирижабли, характеризующиеся возможностью длительного полета при незначительном потреблении энергии [2, 3].

Вертикальное маневрирование микродирижаблей базируется на зависимости плотности гелия или воздуха от температуры [4, 5]. Одно из известных технических решений по изменению температуры рабочего тела основано на утилизации теплоты выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания, обеспечивающих горизонтальное перемещение летательных аппаратов [6]. При этом управление вертикальным маневрированием достигается изменением направления потока выхлопных газов, а экстренное снижение – выводом нагретого воздуха через систему клапанов. Однако описываемая конструкция является довольно громоздкой, а развиваемая подъемная сила зависит от режимов работы двигателя, что требует дополнительного регулирования. Вторым недостатком летательного аппарата является небольшая скорость его снижения, а это в свою очередь существенно усложняет или исключает точное приземление микродирижабля на ограниченных площадях.

В практике дирижаблестроения получила распространение термобалансирующая конструкция [7], содержащая гондолу, движитель горизонтального

перемещения, систему создания подъемной силы, оболочку, солнечные батареи и аккумулятор. В этой конструкции система создания подъемной силы включает в себя компрессор, ресивер-теплообменник, тепловой насос и детандер, которые образуют замкнутый контур. Однако такому микродирижаблю также присущ ряд недостатков: повышенная масса ввиду наличия большого количества металлоемких элементов, низкая энергетическая эффективность движителя при его работе в режиме ветродвигателя и недостаточная надежность солнечных батарей вследствие возможного выхода их строя в результате перегрева. Кроме того, в микродирижабле не предусмотрено уменьшение температуры рабочего тела при необходимости снижения, а работоспособность системы создания подъемной силы находится в зависимости от режима работы движителя горизонтального перемещения. Наконец, процесс создания подъемной силы микродирижабля характеризуется высокой инерционностью вследствие локального нагрева внутреннего пространства с помощью ресивера-теплообменника.

Цель исследований: совершенствование конструкции микродирижабля, заключающееся в снижении массы системы создания подъемной силы, повышении энергетической эффективности дирижабля и надежности солнечных батарей, обеспечении возможности вертикального маневрирования за счет энергосберегающего повышения и понижения температуры гелия, исключении зависимости работоспособности системы создания подъемной силы от режима работы движителя горизонтального перемещения, а также в снижении инерционности процесса создания подъемной силы.

Материалы и методы

В качестве исходных материалов использованы сведения из классической теории аэродинамики, информация о свойствах полупроводниковых термоэлементов, а также теория замкнутых систем автоматического управления. При работе над совершенствованием конструкции микродирижаблей применялись методы индукции и аналогии.

Результаты и их обсуждение

Проведенные изменения в конструкции микродирижабля были направлены на совершенствование автономной энергетической системы, реализуемой фотоэлектрическими элементами, термоэлектрическими преобразователями, аккумулятором, блоком управления и другим электрооборудованием. На рисунке 1 представлена схема размещения

используемого электрооборудования, а на рисунке 2 – расположение датчика температуры.

Гондola 1 представляет собой обтекаемую капсулу с низким коэффициентом лобового сопротивления в направлении горизонтального движения дирижабля [8]. Движитель 2 горизонтального перемещения расположен в хвостовой части микродирижабля. При использовании движителя 2 в виде двух и более тяговых устройств возможно их расположение на боковых внешних поверхностях оболочки 3. Оболочка 3 представляет собой форму вытянутого эллипсоида вращения, имеющего экваториальную линию¹. В рабочем состоянии микродирижабля большая ось вытянутого эллипсоида вращения параллельна поверхности Земли. Внутреннее пространство микродирижабля ограничено оболочкой 3 и заполнено гелием. Расположение фотоэлектрических

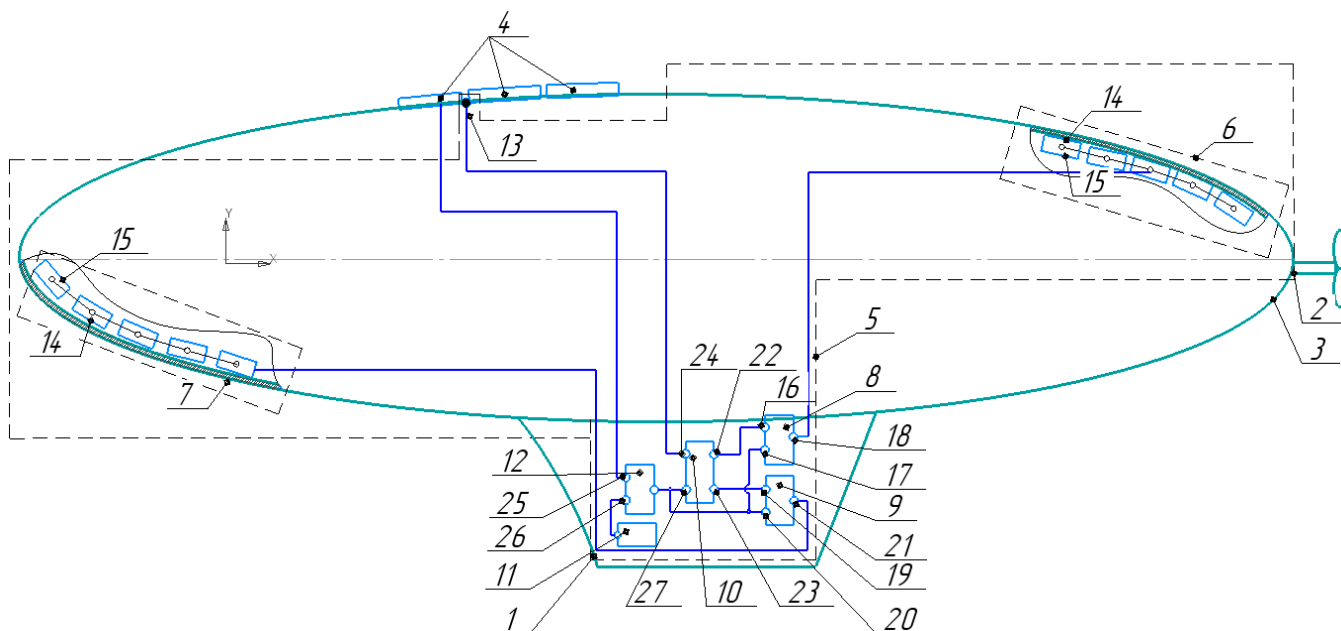


Рис. 1. Размещение электрооборудования на беспилотном микродирижабле:

- 1 – гондola; 2 – движитель горизонтального перемещения; 3 – оболочка; 4 – фотоэлектрические элементы; 5 – система создания подъемной силы; 6, 7 – первый и второй блоки термоэлектрических преобразователей; 8, 9 – первое и второе коммутационные устройства; 10 – блок управления; 11 – аккумулятор электрической энергии; 12 – контроллер; 13 – датчик температуры; 14, 15 – первая и вторая рабочие поверхности блоков термоэлектрических преобразователей; 16, 17 – информационный и силовой входы первого коммутационного устройства; 18 – выход первого коммутационного устройства; 19, 20 – информационный и силовой входы второго коммутационного устройства; 21 – выход второго коммутационного устройства; 22, 23 – первый и второй выходы блока управления; 25, 26 – первый и второй входы контроллера; 27 – питающий вход блока управления

Fig. 1. Electrical equipment layout in an unmanned micro-airship:

- 1 – nacelle; 2 – horizontal travel propulsor; 3 – shell; 4 – photoelectric elements; 5 – lift generation system; 6 and 7 – first and second blocks of thermoelectric converters; 8 and 9 – first and second switching devices; 10 – control unit; 11 – electric energy accumulator; 12 – controller; 13 – temperature sensor; 14 and 15 – first and second working surfaces of thermoelectric converter units; 16 and 17 – information and power inputs of the first switching device; 18 – output of the first switching device; 19, 20 – information and power inputs of the second switching device; 21 – output of the second switching device; 22, 23 – first and second outputs of the control unit; 25, 26 – first and second inputs of the controller; 27 – power input of the control unit

¹ Кирилин А.Н. Малоразмерные дирижабли. Конструкции и эксплуатация. М.: Изд-во МАИ, 2003. 115 с.

элементов 4 (солнечных батарей) на внешней поверхности оболочки 3, над экваториальной линией, объясняется значительно большей освещенностью верхней части микродирижабля по сравнению с нижней. Фотоэлектрические элементы 4 выполнены в форме пластин из монокристаллов кремния [9, 10], объединенных в модули с размерами 156×156 и массой 7 г. В перспективе для микродирижаблей могут быть использованы тонкопленочные фотоэлектрические преобразователи на основе $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS) [11].

Первый 6 и второй 7 блоки термоэлектрических преобразователей [12] установлены на внутренней поверхности оболочки 3. В качестве термоэлектрических преобразователей могут быть использованы элементы Ferrotec (Ferrotec 9500/127/120B) или Custom Thermoelectric (Custom Thermoelectric MRF92). Максимальная разность температур для этих элементов составляет 70°C , а максимальная мощность охлаждения (Q_{max}) – 310 Вт.

При подаче постоянного электрического напряжения происходит разнозначное изменение температуры их противоположных поверхностей. Первое коммутационное устройство 8 обеспечивает прохождение электрического тока между его силовым входом 17 и выходом 18 при подаче сигнала на информационный вход 16, а второе коммутационное устройство 9 – прохождение электрического тока между его силовым входом 20 и выходом 21 при подаче сигнала на информационный вход 19. Рабочий диапазон параметрического датчика 13 температуры, установленного между оболочкой 3 и фотоэлектрическими элементами 4 (рис. 2), ограничен значениями 35°C и $+80^\circ\text{C}$ [13].

Первая рабочая поверхность 14 блоков 6 и 7 термоэлектрических преобразователей обращена к внутренней поверхности оболочки 3, а вторая 15 – к внутреннему пространству дирижабля [14].

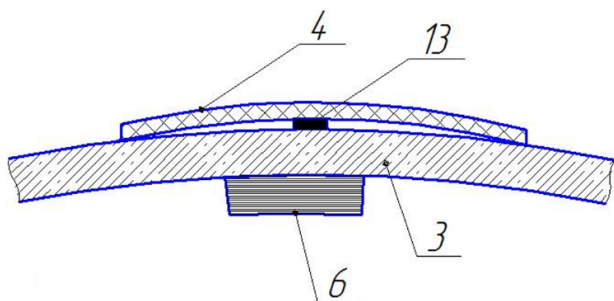


Рис. 2. Расположение датчика температуры:

3 – оболочка; 4 – фотоэлектрические элементы;
6 – блок термоэлектрических преобразователей;
13 – датчик температуры

Fig. 2. Location of the temperature sensor:

3 – shell; 4 – photovoltaic elements;
6 – thermoelectric transducer unit; 13 – temperature sensor

Перед началом полета внутреннее пространство дирижабля, ограниченное оболочкой 3, заполняется гелием. В соответствии с законом Архимеда в дирижабле создается подъемная сила [15]. Система 5 создания подъемной силы обеспечивает вертикальное маневрирование дирижабля в зависимости от заданного режима полета блоком 10 управления с учетом температуры в области, находящейся между фотоэлектрическими элементами 4 и первым блоком 6 термоэлектрических преобразователей. Для обеспечения полета дирижабля по необходимой траектории используется движитель 2 горизонтального перемещения. Фотоэлектрические элементы 4, находясь под действием солнечного света, преобразуют световую энергию в электрическую. Эта энергия поступает на первый вход 25 контроллера 12. На второй вход 26 контроллера 12 поступает электрическая энергия от аккумулятора 11.

Алгоритм работы контроллера 12 записывается следующим образом:

$$\text{при } U_{\text{фз}} - U_{\text{акк}} > 0, U_{\text{п}} = U_{\text{фз}};$$

$$\text{при } U_{\text{фз}} - U_{\text{акк}} \leq 0, U_{\text{п}} = U_{\text{акк}},$$

где $U_{\text{фз}}$ – напряжение, развиваемое фотоэлектрическими преобразователями, В; $U_{\text{акк}}$ – напряжение на зажимах аккумулятора, В; $U_{\text{п}}$ – напряжение, подаваемое на питающий вход 27 блока 10 управления, и силовые входы 17 и 20 коммутационных устройств 8 и 9.

Солнечная энергия, приходящаяся на поверхность оболочки дирижабля, помимо светового воздействия, вызывает повышение ее температуры. Одновременно с нагревом оболочки 3 происходит повышение температуры фотоэлектрических элементов 4. Кроме того, фотоэлектрические элементы 4 дополнительно прогреваются за счет протекания по ним электрического тока. С эксплуатационной точки зрения такой нагрев нежелателен, поскольку при высоком световом потоке и большой нагрузке возможен перегрев фотоэлектрических элементов 4, а это в свою очередь приводит к снижению их КПД или выходу из строя. Установленный на внутренней поверхности оболочки 3, над ее экваториальной линией, первый блок 6 термоэлектрических преобразователей при соответствующем включении обеспечивает отток тепловой энергии. Это происходит следующим образом.

Информация о температуре между фотоэлектрическими элементами 4 и первым блоком 6 термоэлектрических преобразователей поступает на информационный вход 24 блока 10 управления. При превышении измеряемой температуры заданного значения

блок 10 управления срабатывает и формирует команду в виде электрического сигнала на своем первом выходе 22. Сигнал подается на информационный вход 16 первого коммутационного устройства 8, обеспечивающего подачу электрической энергии от аккумулятора 11 через свой выход 18 к первому блоку 6 термоэлектрических преобразователей. Это сопровождается охлаждением первой рабочей поверхности 14 и нагревом второй рабочей поверхности 15 первого блока 6 термоэлектрических преобразователей. В соответствии с принципом действия термопар под влиянием приложенного к ним электрического напряжения происходит перенос тепловой энергии. В нашем случае перенос тепловой энергии происходит из пространства между фотоэлектрическими элементами 4 и первым блоком 6 термоэлектрических преобразователей во внутреннее пространство микродирижабля. За счет оттока тепловой энергии температура фотоэлектрических элементов 4 остается достаточно низкой.

При взлете дирижабля на выходах 22 и 23 блока 10 управления появляются электрические сигналы, поступающие на информационные входы 16 и 19 коммутационных устройств 7 и 9. Это приводит к подаче электрического напряжения на блоки 6 и 7 термоэлектрических преобразователей.

Первая рабочая поверхность 14 блоков 5 и 7 термоэлектрических преобразователей охлаждается, а вторая рабочая поверхность 15 этих блоков нагревается. Происходит перенос тепловой энергии из окружающей среды во внутреннее пространство микродирижабля. Температура гелия в пространстве дирижабля, ограниченного оболочкой 3, повышается, что приводит к уменьшению его плотности в соответствии с законом:

$$\rho_r = \frac{Pm}{RT},$$
 где P – давление, Па; m – молярная масса, кг; R – газовая постоянная, $R = 8,31 \text{ Дж } K^{-1} \text{ моль}^{-1}$; T – температура газа, °К. В свою очередь, уменьшение плотности гелия определяет рост подъемной силы $F = V \cdot (\rho_v - \rho_r)g$, где V – объем внутреннего пространства микродирижабля, m^3 ; ρ_v – плотность воздуха, kg/m^3 ; g – ускорение свободного падения, m/s^2 .

При необходимости менее интенсивного нагрева гелия электрический сигнал появляется только на первом выходе 22 блока 10 управления. Этот сигнал поступает на информационный вход 16 первого коммутационного устройства 8 и вызывает подачу электрической энергии с его выхода 18 на первый блок 6 термоэлектрических преобразователей. В этом случае нагреву подвергается только рабочая поверхность 15 первого блока 6 термоэлектрических преобразователей, что приводит к менее интенсивному нагреву гелия.

Для быстрого снижения высоты полета или экстренного приземления микродирижабля полярность электрических сигналов, поступающих с первого выхода 22 и со второго выхода 23 блока 10 управления на информационный вход 16 первого коммутационного устройства 8 и на информационный вход 19 второго коммутационного устройства 9, меняется на противоположную. При этом изменяется полярность электрического напряжения, поступающего с выхода 18 первого коммутационного устройства 8 и с выхода 21 второго коммутационного устройства 9 на первый блок 6 и второй блок 7 термоэлектрических преобразователей. Первые рабочие поверхности 14 первого блока 6 и второго блока 7 термоэлектрических преобразователей нагреваются, а вторые рабочие поверхности 15 первого блока 6 и второго блока 7 термоэлектрических преобразователей охлаждаются. Происходит перенос тепловой энергии из внутреннего пространства микродирижабля, ограниченного оболочкой 3, в окружающую среду. Температура гелия снижается, его плотность возрастает, и подъемная сила уменьшается.

Аналогично при необходимости медленного снижения микродирижабля включается только второй блок 7 термоэлектрических преобразователей. При этом первая рабочая поверхность 14 второго блока 7 термоэлектрических преобразователей нагревается, а вторая рабочая поверхность 15 охлаждается.

Таким образом, система 5 создания подъемной силы осуществляет нагрев или охлаждение гелия в объеме, ограниченном оболочкой 3, за счет переноса тепловой энергии из внешней среды во внутреннее пространство микродирижабля или из этого пространства во внешнюю среду. Эффект энергосбережения достигается за счет затрат электроэнергии исключительно на обеспечение работоспособности термоэлектрических преобразователей. Кроме того, первый блок 6 термоэлектрических преобразователей обеспечивает отвод тепловой энергии от фотоэлектрических элементов 4, предотвращая их перегрев при ярком солнце и значительном потребляемом токе.

Очевидным преимуществом конструкции является независимость работоспособности используемого в ней механизма создания подъемной силы от тепловой энергии выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания, часто применяемых для горизонтального перемещения. Незначительное увеличение массы микродирижабля, обусловленное наличием фотоэлектрических элементов 4, компенсируется существенным увеличением объема электрической энергии, получаемой в результате преобразования солнечной энергии в светлое время суток. Благодаря

размещению блоков термоэлектрических преобразователей 6 и 7 на всей внутренней поверхности оболочки 3 снижается инерционность изменения температуры гелия, что сокращает продолжительность вертикального маневрирования микродирижабля.

Выводы

1. Перспективным направлением совершенствования микродирижаблей сельскохозяйственного назначения является повышение их энергетической

эффективности посредством размещения фотоэлектрических элементов на внешней поверхности оболочки выше экваториальной линии.

2. Термоэлектрические преобразователи, установленные на внутренней поверхности оболочки микродирижабля, позволяют снизить массу и инерционность системы создания подъемной силы, а также повысить надежность фотоэлектрических элементов за счет предотвращения их перегрева.

Список источников

1. Огородников П.И., Усик В.В., Лизнева И.А. Эффективность сельскохозяйственных авиационно-химических работ // Вестник Оренбургского государственного университета. 2006. № 2-1 (52). С. 103-105. EDN: JVGSIR
2. Чуба А.Ю., Чуба А.Ю. Использование беспилотных авиационных систем в сельском хозяйстве // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2019. № 3 (77). С. 161-163. EDN: XDBPPB
3. Weiyu Zhu, Yuanming Xu, Huafei Du, Jun Li. Thermal performance of high-altitude solar powered scientific balloon. *Renewable Energy*. 2019;135:1078-1096. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.12.083>
4. Liu Q., Yang Y., Cui Y., Cai J. Thermal performance of stratospheric airship with photovoltaic array. *Advances in Space Research*. 2017;59(6):1486-1501. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.12.029>
5. Du H., Lyu M., Yu C., Wu Y., Wu Y., Sun K. Numerical simulation of fluid-thermal-structural coupling characteristics of stratospheric non-rigid airship. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2024;37(9):224-236. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2024.05.027>
6. Дирижабль: Патент RU2580385 C1, МПК B61B1/36 (2006.01) / Ю.А. Щепочихина; Заяв. № 2015107133/11 от 02.03.2015, опубл. 10.04.2016, Бюл. № 10. EDN: BRBSMQ
7. Термобалансируемый дирижабль: Патент RU2457149 C2, МПК B64B1/06 (2006/01), B64B1/62, (2006/01) / А.Л. Шпади, И.И. Калалетдинов; Заяв. 2010127017/11 от 01.07.2010, опубл. 27.07.2012, Бюл. № 21. EDN: QWRIKU
8. Биматов В.И., Куденцов В.Ю., Трушляков В.И. Методика экспериментального определения коэффициента силы лобового сопротивления неустойчивых в полете тел // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2022. № 75. С. 67-72. EDN: YXWEXE
9. Исса Х.А., Абдали Л.М., Якимович Б.А. и др. Сравнение эффективности различных методов управления энергетическими параметрами фотоэлектрических систем // Труды МАИ. 2023. № 128. <https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-17>
10. Yi Jiang, Mingyun Lv, Kangwen Sun. Effects of installation angle on the energy performance for photovoltaic cells during airship cruise flight. *Energy*. 2022;258:124982. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124982>
11. Chander S., Tripathi S.K., Kaur I., Arijit K.De. Non-toxic and earth-abundant Cu₂ZnSnS₄ (CZTS) thin film solar cells: A review on high throughput processed methods. *Materials Today Sustainability*. 2024;25:100662. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2023.100662>
12. Анатычук Л.И. Современное состояние и некоторые перспективы термоэлектричества // Термоэлектричество. 2007. № 2. С. 7-20. EDN: NUYCEB
13. Белов Д.В., Андреев С.А. Расчет скорости нагрева гелия в рабочей камере дирижабля // Современные

References

1. Ogorodnikov P.I., Usik V.V., Lizneva I.A. Efficiency of agricultural aircraft-chemical works. *Vestnik Orenburgskogo Gosudarstvennogo Universiteta*. 2006;2-1:103-105. (In Russ.)
2. Chuba A.Yu., Chuba A.Yu. The use of unmanned aircraft systems in agriculture. *Izvestiya Orenburgskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta*. 2019;3(77):161-163. (In Russ.)
3. Weiyu Zhu, Yuanming Xu, Huafei Du, Jun Li. Thermal performance of high-altitude solar powered scientific balloon. *Renewable Energy*. 2019;135:1078-1096. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.12.083>
4. Liu Q., Yang Y., Cui Y., Cai J. Thermal performance of stratospheric airship with photovoltaic array. *Advances in Space Research*. 2017;59(6):1486-1501. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.12.029>
5. Du H., Lyu M., Yu C., Wu Y., Wu Y., Sun K. Numerical simulation of fluid-thermal-structural coupling characteristics of stratospheric non-rigid airship. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2024;37(9):224-236. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2024.05.027>
6. Shchepochikhina Yu.A. Airship: Patent of the Russian Federation No. 2580385, IPC B61B1 / 36 (2006.01). Application No. 2015107133/11. 2016. (In Russ.)
7. Shpadi A.L., Kalaletdinov I.I. Thermobalanced dirigible: Patent No. 2457149 Russian Federation, IPC B64B1/06 (2006/01), B64B1/62, (2006/01. Application 2010125017/11. 2012. (In Russ.)
8. Bimatov V.I., Kudentsov V.Yu., Trushlyakov V.I. Technique for the experimental determination of the force coefficient of the frontal co-resistance of unstable in flight bodies. *Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 2022;75:67-72. (In Russ.)
9. Issa H.A., Abdali L.M., Yakimovich B.A. et al. Comparison of the efficiency of various methods for controlling the energy parameters of photovoltaic systems. *Trudy MAI*. 2023;128;17. (In Russ.)
10. Yi Jiang, Mingyun Lv, Kangwen Sun. Effects of installation angle on the energy performance for photovoltaic cells during airship cruise flight. *Energy*. 2022;258:124982. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124982>
11. Chander S., Tripathi S.K., Kaur I., Arijit K.De. Non-toxic and earth-abundant Cu₂ZnSnS₄ (CZTS) thin film solar cells: A review on high throughput processed methods. *Materials Today Sustainability*. 2024;25:100662. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2023.100662>
12. Anatychuk L.I. Current state and some prospects of thermoelectricity. *Termoelektichestvo*. 2007;2:7-20. (In Russ.)
13. Belov D.V., Andreev S.A. Calculation of the heating rate of helium in the working chamber of the airship. *Modern energy-saving thermal and heat-mass-volume technologies (drying and mass-exchange processes) SETMT 2023, VIII International Scientific and Practical Conference, Moscow: October 17-19, 2023. Pp. 327-330. (In Russ.)*

энергосберегающие тепловые и массообменные технологии (сушка, тепловые и массообменные процессы) СЭТМТ-2023: Сборник научных трудов Восьмой Международной научно-практической конференции, Москва, 17-19 октября 2023 г. М.: ООО «Мегаполис», 2023. С. 327-330. EDN: ICQYMA

14. Дирижабль: Патент RU2751924 C1, МКП B64B1/06 (2006.01), МКП B64B1/62 (2006.01), МКП H01135/40 (2006.01) / Д.В. Белов, С.А. Андреев; Заяв. № 2020136535 от 11.01.2021, опубл. 10.07.2021, Бюл. № 20. EDN: XCESVN

15. Bhat S.S., Anavatti S.G., Garratt M., Ravi S. Review of autonomous outdoor blimps and their applications. Drone Systems and Applications. 2024;12:1-21. <https://doi.org/10.1139/dsa-2023-0052>

Информация об авторах

¹Белов Дмитрий Владимирович, аспирант; SPIN-код: 6722-9029, AuthorID: 1189250; dmitri.belov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0009-0005-8015-2067>

²Кабдин Николай Егорович, канд. техн. наук, доцент; SPIN-код: 7014-5110, AuthorID: 761582; energo-nek@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4104-4187>

³Андреев Сергей Андреевич, д-р техн. наук, доцент; SPIN-код: 8453-6024, AuthorID: 701225; asa-finance@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8608-9904>

^{1,2,3}Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Вклад авторов

Д.В. Белов – концептуализация (формулирование идеи снижения массы системы создания подъемной силы и повышении энергетической эффективности дирижабля посредством изменения температуры гелия, а также исключения зависимости работоспособности системы создания подъемной силы от режима работы двигателя горизонтального перемещения).

Н.Е. Кабдин – визуализация и разработка программного обеспечения (разработка и описание функциональной схемы управляющего устройства и схемы размещения элементов электрооборудования, разработка алгоритма работы контроллера).

С.А. Андреев – администрирование данных (деятельность по аннотированию), создание черновика рукописи, создание окончательной версии рукописи и ее редактирование

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 09.08.2024, после рецензирования и доработки 26.08.2024; принята к публикации 28.08.2024.

14. Belov D.V., Andreev S.A. Airship: Patent No. 2751924 Russian Federation, IPC B64B1/06 (2006.01), IPC B64B1/62 (2006.01), IPC H01135/40 (2006.01). Application No. 2020136535. 2021. (In Russ.)

15. Bhat S.S., Anavatti S.G., Garratt M., Ravi S. Review of autonomous outdoor blimps and their applications. Drone Systems and Applications. 2024;12:1-21. <https://doi.org/10.1139/dsa-2023-0052>

Author Information

¹Dmitriy V. Belov, PhD student; dmitri.belov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0009-0005-8015-2067>

²Nikolay E. Kabdin, CSc (Eng), Associate Professor; energo-nek@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4104-4187>

³Sergey A. Andreev, DSc (Eng), Associate Professor; asa-finance@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8608-9904>

^{1,2,3}Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation

Author Contribution

D.V. Belov – conceptualization;

N.E. Kabdin – visualization and software development;

S.A. Andreev – data administration, writing – original draft preparation, review and editing of the manuscript.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests and are responsible for plagiarism.

Received 09.08.2024; Revised 26.08.2024; Accepted 28.08.2024

ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 378.4:373.68

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-89-95>

Стратегические ориентиры развития аграрного образования: форсайт-кейс РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева

В.И. Трухачев¹, Е.В. Хохлова², Е.Н. Кролевецкая³^{1,2,3} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия¹ rector@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4650-1893>² e.hohlova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7608-5838>³ kroleveczkaya@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1312-3638>

Аннотация. Национальная цель достижения устойчивой и динамичной экономики для системы высшего аграрного образования связана прежде всего с кадровым обеспечением отрасли АПК. Сегодня сельскому хозяйству нашей страны необходимы кадры новой формации, обладающие уникальными навыками и компетенциями, высоким творческим потенциалом. Это требует пересмотра стратегических ориентиров развития и совершенствования системы непрерывной подготовки кадров для сельского хозяйства, связанных с приоритетными направлениями развития АПК Российской Федерации. Цель исследований – определение стратегических ориентиров развития аграрного образования в России в условиях достижения технологического суверенитета страны. Целенаправленная работа по выявлению стратегических ориентиров развития аграрного образования проводилась в течение 2023-2024 гг. на базе Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К.А. Тимирязева (РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева). Определение стратегических ориентиров осуществлялось экспертным сообществом с использованием метода экспертных оценок, опросов, мозгового штурма, форсайт-анализа и обобщения. В обсуждении приняли участие около 180 ведущих ученых РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, приглашенные эксперты. Форсайт-кейс РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева показал, что стратегические задачи, которые ставят перед собой аграрные вузы России в области образовательной политики, связаны с обеспечением вариативности и гибкости подготовки специалистов АПК, изменениями в содержании образовательных программ, усилением их научной составляющей, совершенствованием образовательных технологий и системы непрерывного аграрного образования, а также с популяризацией работы в сельском хозяйстве. В результате определено 7 групп стратегических задач развития аграрного образования в России.

Ключевые слова: стратегические ориентиры, ориентиры развития аграрного образования, форсайт-анализ, форсайт-кейс, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева

Для цитирования: Трухачев В.И., Хохлова Е.В., Кролевецкая Е.Н. Стратегические ориентиры развития аграрного образования: форсайт-кейс РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 1. С. 89-95. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-89-95>

ORIGINAL ARTICLE

Strategic guidelines for the development of agrarian education: foresight case of Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy

V.I. Trukhachev¹, E.V. Khokhlova², E.N. Krolevetskaya³^{1,2,3} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia¹ rector@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4650-1893>² e.hohlova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7608-5838>³ kroleveczkaya@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1312-3638>

Abstract. The national goal of achieving a sustainable and dynamic economy for the system of higher agricultural education primarily relates to the human resource supply of the agro-industrial sector. Today, the agro-industrial

sector of our country needs new-breed workforce, possessing unique skills and competencies, as well as high creative potential. This, of course, requires revision of strategic guidelines for the development and improvement of the system of continuous training of workforce for agriculture related to the priority development areas of the national agro-industrial sector. The aim of the study is to identify strategic guidelines for the development of agricultural education in Russia in the context of achieving technological sovereignty of the country. In 2023-2024, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy carried out targeted work to identify strategic benchmarks for the development of agrarian education. This task was accomplished by the expert community using the method of expert assessments, surveys, brainstorming, foresight analysis and generalization. About 180 leading scientists of Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy and external experts took part in the discussion. The foresight case showed that the strategic objectives set by Russian agrarian universities in the field of educational policy correlate with the aim to ensure variability and flexibility in the training of agricultural specialists, changes in the content of training programs, strengthening their scientific component, improving teaching techniques and the whole system of continuous agrarian education, as well as promoting agricultural careers. As a result, the research team has identified seven groups of strategic objectives for the development of agrarian education in Russia.

Keywords: strategic guidelines, strategic development objectives of agrarian education, foresight analysis, foresight case, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy

For citation: Trukhachev V.I., Khokhlova E.V., Krolevetskaya E.N. Strategic guidelines for the development of agrarian education: foresight case of Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(1):89-95 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-89-95>

Введение

Сельскохозяйственная отрасль Российской Федерации имеет стратегическое значение для устойчивого развития государства и обеспечения его продовольственной безопасности. Вместе с тем аграрный сектор экономики сегодня сталкивается с проблемой острой нехватки высококвалифицированных специалистов. В этой связи поставленные Президентом РФ национальные цели развития Российской Федерации на период до 2030 г. и на перспективу до 2036 г.¹ меняют приоритеты системы высшего образования в целом, и аграрного образования – в частности. Национальная цель достижения устойчивой и динамичной экономики для системы высшего аграрного образования связана прежде всего с кадровым обеспечением отрасли АПК. Сегодня сфере сельского хозяйства нашей страны необходимы кадры новой формации, обладающие уникальными навыками и компетенциями, высоким творческим потенциалом². Это требует пересмотра стратегических ориентиров развития и совершенствования системы непрерывной подготовки кадров для сельского хозяйства, связанных с приоритетными направлениями развития АПК Российской Федерации.

Стратегический ориентир – это перспективный взгляд на развитие образовательной системы,

связанный с изменением ценностей, убеждений, модели функционирования системы, заданной определенными целевыми установками [1, 2]. Проблема стратегических перспективных направлений развития российского аграрного образования связана с исследованием роли аграрных вузов как ключевого звена указанного процесса. Аграрные университеты рассматриваются как «поставщики инноваций» в АПК [3], развивающиеся на основе принципа интеграции, кластеризации ресурсов и интересов всех участников образовательного процесса [4], как центры бизнес-ориентированной аграрной науки³ [5]. Понимание стратегических ориентиров развития аграрного образования в России позволит сделать реальные шаги по его модернизации, что обеспечит прирост человеческого капитала АПК и устойчивое развитие сельских территорий Российской Федерации.

Министерство сельского хозяйства РФ, планируя реализацию с 2025 г. Национального проекта «Технологическое обеспечение продовольственной безопасности»⁴, формирует запрос аграрным вузам на непрерывность подготовки специалистов АПК,

¹ О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года: Указ Президента РФ от 7 мая 2024 г. № 309.

² Об утверждении Стратегии устойчивого развития сельских территорий Российской Федерации на период до 2030 года: Распоряжение Правительства РФ от 2 февраля 2015 г. № 151-р.

³ Орлова Н.В., Николаев Д.В., Серова Е.В. Аграрное образование в контексте перехода к АПК 4.0. Анализ международного опыта. Рекомендации для России: Доклад НИУ ВШЭ. М.: Издательский дом Высшей школы экономики, 2021. 78 с.

⁴ На заседании Коллегии Минсельхоза обсудили итоги и приоритеты развития АПК России: Официальный сайт Министерства сельского хозяйства Российской Федерации. [Электронный ресурс]. 2024. 11 сентября. URL: <https://mcx.gov.ru/press-service/news/na-zasedanii-kolleгии-minselkhoz-a-obsudili-itogi-prioritety-razvitiya-apk-rossii/> (дата обращения 27.09.2024).

на выстраивание и сопровождение траектории развития специалиста от агрокласса до работодателя. Такой запрос меняет подходы и требования к системе высшего аграрного образования, которые предполагают большую гибкость и опережающий характер образовательных программ, вовлеченность студентов в реальные прикладные проекты, тесную интеграцию с индустриальными партнерами. Это меняет и современный аграрный вуз, который становится пространством возможностей для профессионального, карьерного, социокультурного, личностного развития будущего специалиста.

Цель исследований: определение стратегических ориентиров развития аграрного образования в России в условиях реализации цели достижения технологического суверенитета страны.

Материалы и методы

Целенаправленная работа по определению стратегических ориентиров развития аграрного образования проводилась в соответствии с принципами системного и компетентностного подходов. Новые образовательные модели аграрного образования обсуждались в рамках научно-практических конференций, проводимых на базе Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К.А. Тимирязева в течение 2023-2024 гг., проектно-аналитических сессий РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, посвященных определению перспектив развития университета до 2030 г. в контексте реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030». Обсуждение и оценка стратегических изменений проводились экспертным сообществом с использованием методов экспертных оценок, опросов, мозгового штурма, форсайт-анализа и обобщения.

В обсуждении перспективных направлений развития аграрного образования в России приняли участие около 180 ведущих ученых РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, приглашенные эксперты из Министерства науки и высшего образования РФ, Министерства сельского хозяйства РФ, ФГАНУ «Социоцентр». Отбор экспертов осуществлялся на основе принципов компетентности (оценка уровня и широты знакомства эксперта с достижениями аграрной науки и образования, понимания проблем и перспектив развития), конструктивности мышления (оценка практичности предложенных решений), креативности (оценка способности предлагать нестандартные решения), отношения к экспертизе (оценка проявленного интереса к проблеме), коллективизма (оценка способности к коллективному способу выработки решений).

Опрос экспертов представлял собой заслушивание и фиксацию в содержательной и количественной форме суждений экспертов по обозначенной проблематике. Форсайт-анализ предполагал использование качественных методов прогнозирования – таких, как экспертные панели, мозговой штурм. В рамках экспертных панелей участники-эксперты на некоторое время объединялись в группу для отслеживания, интерпретации и прогнозирования дальнейших изменений в аграрном образовании. Для получения нестандартных вариантов стратегического видения решения проблемы использовался метод мозгового штурма – групповое обсуждение, предполагающее чередование периодов генерации с дискуссиями и групповым принятием решения (такты). В группу ведущих ученых РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева на каждом такте включался внешний приглашенный эксперт-«усилитель» идей. Обобщение и интерпретация полученных данных происходили путем интеграции результатов, полученных с помощью обозначенных методов.

Результаты и их обсуждение

Системный подход к определению стратегических ориентиров развития аграрного образования в России требует целостного взгляда на необходимые изменения в профессиональной подготовке будущих специалистов АПК. Считаем возможным на примере Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К.А. Тимирязева, как главного аграрного вуза страны, обозначить основные стратегические направления модернизации аграрного образования.

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева сегодня – это ведущий учебный, научный, методический и консультационный центр системы аграрного образования России, осуществляющий инновационную деятельность в целях содействия эффективному производству высококачественной, конкурентоспособной продукции агропромышленного комплекса и устойчивому развитию сельских территорий. Являясь флагманом изменений в отраслевом образовании, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева транслирует эффективные образовательные модели и лучшие практики подготовки специалистов АПК на все аграрные вузы страны.

Форсайт-анализ показал, что стратегические задачи, которые ставит сегодня перед собой РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева в области образовательной политики, связаны с обеспечением вариативности и гибкости подготовки специалистов АПК, изменениями в содержании образовательных программ,

усилением их научной составляющей, совершенствованием образовательных технологий и в целом системы непрерывного аграрного образования, а также с популяризацией работы в сельском хозяйстве. Обобщение результатов экспертного опроса позволило выделить 7 групп стратегических задач развития РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева:

1. *Совершенствование компетентностной модели выпускника аграрного профиля.* Решение этой стратегической задачи связано с обеспечением вариативного подхода к развитию компетенций выпускника аграрного профиля за счет гибкости образовательных траекторий и возможности выбора в рамках образовательной программы компетентностных (образовательных) треков профессионального развития будущих специалистов: технологического, исследовательского, цифрового, управленческого, предпринимательского, трека дополнительной квалификации (как в рамках образовательной программы, так и за ее пределами) (рис.).

2. *Модернизация содержания образовательных программ университета профильных для АПК направлений.* Предполагается ряд изменений:

- создание междисциплинарных образовательных программ в сферах опережающего развития АПК;
- привлечение целевого заказчика (представителей реального сектора экономики АПК, представителей бизнеса) к разработке и экспертизе содержания образовательных программ;
- модернизация содержания образования профильных дисциплин, усиление фундаментальности профильных знаний;
- профилизация непрофильных учебных дисциплин (включение в учебные планы дисциплин экономического, управленческого, цифрового и других профилей, раскрывающих их специфику в АПК);
- выполнение выпускных квалификационных работ «под заказ» работодателя/бизнеса;
- усиление многоступенчатой практической подготовки будущих специалистов на базе

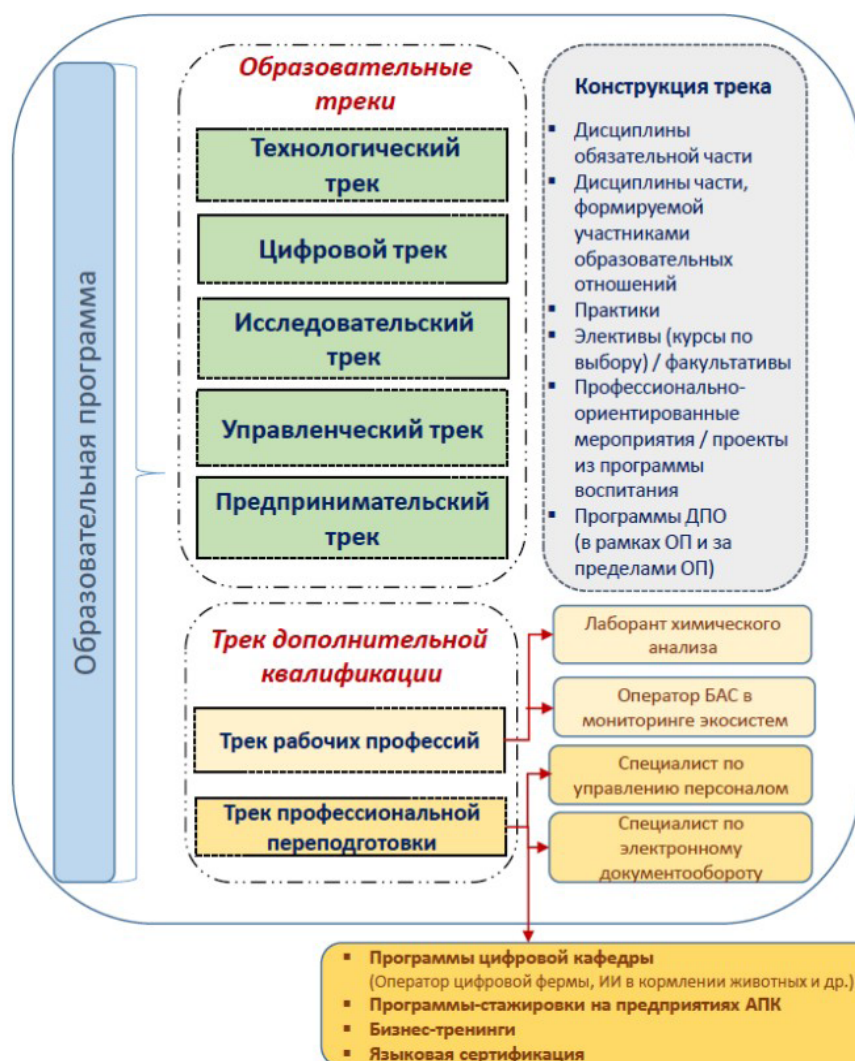


Рис. Пример архитектуры образовательной программы РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева
Fig. Example of a curriculum design made in Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy

университета – учебных комбинатов, опытных хозяйств и станций, МИПов; на базе предприятий АПК, фермерских хозяйств, бизнес-организаций – расширение полевой практики в сельской местности;

– предоставление студентам возможности совмещения учебы с работой по специальности, осуществления трудовой деятельности (частичная занятость) на базе вуза, организации мини-производства с использованием материально-технической базы вуза;

– расширение совместных образовательных программ профильных для АПК направлений, в том числе с международными партнерами (система двойных дипломов);

– увеличение числа базовых кафедр при поддержке бизнеса.

3. Усиление наукоцентричности образовательных программ университета профильных для АПК направлений. Решение этой стратегической задачи видится через использование научных исследований и разработок в качестве источника обновления содержания образования профильных дисциплин; обеспечение интеграции образовательного процесса с наукой (участие студентов в научных исследованиях профильных кафедр, публикация научных статей по итогам выполнения учебных проектов, курсовых работ, ВКР); усиление фундаментальной составляющей научно-исследовательских и инновационных проектов студентов в сфере АПК (включение в учебные планы дисциплин, связанных с фундаментальными разработками в сфере АПК, методологией и методами научных исследований, коммерциализацией научного продукта); вовлечение обучающихся в научно-исследовательскую деятельность, стимулирование конкурсной, грантовой, изобретательской активности; представление результатов НИОКР в продуктовой логике, увеличение числа научных разработок и РИД студентов.

4. Совершенствование образовательных технологий. Решение этой стратегической задачи предполагает использование информационных технологий обучения в образовательном процессе, в том числе технологии искусственного интеллекта; проведение учебных занятий в цифровой среде, в том числе иммерсивной среде, с использованием технологий виртуальной (VR), дополненной (AR), смешанной (MR) реальности, 3D-визуализации и моделирования; использование субъектно-ориентированных, интерактивных, проектных, практико-ориентированных технологий обучения и профессионального воспитания будущих специалистов АПК.

5. Трансформация подходов и моделей профессионального воспитания личности будущего специалиста АПК. Предполагается усиление рабочей программы воспитания, являющейся частью основной

профессиональной образовательной программы, мероприятиями и проектами, развивающими интерес к русской культуре, искусству, народному творчеству, обеспечивающими продвижение и защиту традиционных российских духовно-нравственных, семейных, патриотических ценностей; внедрение во все образовательные программы университета образовательного подхода «Обучение служением»; вовлечение студентов в добровольческую и общественную деятельность, в социально-воспитательные проекты и программы, направленные на развитие их командных и лидерских качеств.

6. Совершенствование системы непрерывного аграрного образования. Решение этой стратегической задачи предполагает системную работу с обучающимися на ступенях основного, среднего профессионального, высшего и дополнительного профессионального образования и реализуется через перманентную профориентационную работу с целевыми школами, агроклассами/онлайн-агроклассами, проводимую совместно с представителями работодателя и бизнеса.

Действенными механизмами в данном случае могут выступить: привлечение профессорско-преподавательского состава университета, специалистов-практиков, предпринимателей для реализации образовательного процесса в целевых школах/классах [6]; использование разнообразия педагогических методов и форм работы с «целевыми школьниками» (дни открытых дверей в университете, летний агролагерь, профильные университетские смены, мастер-классы, акции, фестивали, выставки, ярмарки, конкурсы, олимпиады, деловые игры, экскурсии, онлайн-занятия и т.п.); обучение учителей для агроклассов (повышение квалификации/профессиональная переподготовка по программам ДПО по профильным для АПК направлениям); стипендии «целевым абитуриентам» от бизнеса/предприятия/вуза; взаимодействие с родителями по вопросам целевого обучения школьников.

Решение этой задачи предполагает профориентационную работу через систему дополнительного образования детей и взрослых, увеличение числа дополнительных общеразвивающих программ, дополнительных предпрофессиональных программ в области сельского хозяйства и АПК; сотрудничество с детскими экологическими объединениями, экостанциями и др.; интеграцию основных профессиональных образовательных программ с программами профессиональной переподготовки, с получением рабочей профессии, возможность прохождения стажировок, бизнес-тренингов, языковой сертификации и др.; модернизацию содержательно-методической основы системы ДПО в сфере АПК (совершенствование преподавания в соответствии с перспективными

трендами и направлениями развития АПК на основе современных образовательных технологий, привлечение педагогов-практиков, педагогов-предпринимателей); расширение площадок и заказчиков ДПО (работники АПК, сотрудники организаций, НПП, фермеры, предприниматели, студенты, пенсионеры); развитие неформальной системы ДПО и системы наставничества в университете.

7. *Популяризация сферы сельского хозяйства, жизни на селе.* В рамках образовательного процесса в стенах университета предполагаются поощрение участия студентов в мероприятиях студенческой организации «Российский союз сельской молодежи»; популяризация программ и конкурсов «Молодые предприниматели села», «Молодые агролидеры России», «Кадры для села» и др., создание и реализация новых проектов, нацеленных на привлечение команд молодых специалистов на предприятия АПК; участие в разработке идеологии жизни на селе, модели достойной жизни на селе, позитивного имиджа АПК, сферы сельского хозяйства, популяризации сельского предпринимательства (эко-предпринимательства, семейного фермерства, сельского туризма).

Обозначив указанные задачи развития как стратегические ориентиры, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева активно участвует в достижении национальной цели устойчивой и динамичной экономики, расширяя спектр образовательных программ опережающей подготовки кадров АПК. Так, в 2024 г. в перечень образовательных программ университета добавились 26 новых программ бакалавриата, 2 программы специалитета, 19 программ магистратуры, созданных по запросу и совместно с работодателями и отвечающих национальным целям развития Российской Федерации. Среди них – ряд образовательных программ, готовящих кадры для реализации цели *достижения экологического благополучия*: «Экология и устойчивое природопользование», «Агроэкология и экологически безопасная продукция», «Управление водными биологическими ресурсами» и др.

В рамках *обеспечения технологического лидерства, технологической независимости и формирования новых рынков* по таким направлениям, как *продовольственная безопасность*, осуществляется подготовка кадров по программам бакалавриата: «Агропромышленная биотехнология», «Технологии пищевой безопасности», «Технологии пищевых ингредиентов и продуктов из растительного сырья», «Хранение и технология продуктов плодовоовощеводства и растениеводства», «Продуктивное животноводство»; по программам магистратуры: «Технология пищевых продуктов и биологически активных веществ из растительного сырья», «Технология

продуктов питания из водных биоресурсов и объектов аквакультуры», «Управление пищевой безопасностью», «Технологии точного животноводства», «Птицеводство», «Пчеловодство» и др.

Университет входит в перечень образовательных организаций высшего образования, осуществляющих разработку и внедрение модулей по обучению навыкам эксплуатации беспилотных авиационных систем (БАС). В РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева они внедрены в основные образовательные программы по направлениям «Сельское, лесное, рыбное хозяйство» и «Ветеринария и зоотехния».

В рамках реализации *цели цифровой трансформации государственного и муниципального управления, экономики и социальной сферы* университет осуществляет подготовку кадров по программам бакалавриата: «Инжиниринг цифровых бизнес-экосистем», «Цифровизация инженерной инфраструктуры (систем водоснабжения и водоотведения)»; по программам магистратуры: «Архитектура систем искусственного интеллекта», «Цифровые системы мониторинга безопасности водохозяйственных объектов в АПК», «Цифровые технологии в землеустройстве агроландшафтов». Во все образовательные программы РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева включены дисциплины по изучению технологии искусственного интеллекта.

Выводы

Форсайт-кейс Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К.А. Тимирязева показал, что стратегические ориентиры развития современного аграрного образования связаны прежде всего с совершенствованием компетентностной модели выпускника аграрного профиля, модернизацией содержания образовательных программ профильных для АПК направлений и усилением наукоцентричности этих образовательных программ, совершенствованием используемых в аграрном вузе образовательных технологий, трансформацией подходов и моделей профессионального воспитания личности будущего специалиста АПК, совершенствованием системы непрерывного аграрного образования в целом, а также с популяризацией в стенах аграрного вуза сферы сельского хозяйства, жизни на селе.

Стратегическое видение опережающих тенденций и «зон роста» в подготовке кадров АПК позволяет обосновывать и транслировать новые модели непрерывного аграрного образования. Они в свою очередь создают возможность готовить команды лидеров изменений, способных внедрять современные подходы и применять инновационные технологии в решении задач достижения технологического суверенитета страны.

Список источников

1. Бердник-Бердыченко Е.Е., Погребач К.С. Стратегические ориентиры развития высшего профессионального образования как инновационного потенциала национальной экономики // Вестник Российского нового университета. Серия «Человек и общество». 2020. № 2. С. 12-17. <https://doi.org/10.25586/RNU.V9276.20.02.P.012>
2. Блинов В.И. Стратегические ориентиры развития среднего профессионального образования // Педагогический поиск. 2020. № 7-8. С. 2-7. EDN: VPLPK
3. Рябчикова Н.Н. Перспективы развития аграрного образования в России: сотрудничество в рамках кластерно-сетевого подхода // Креативная экономика. 2020. Т. 14, № 4. С. 529-540. <https://doi.org/10.18334/ce.14.4.100744>
4. Шумакова О.В., Мозжерина Т.Г. Современная модель непрерывного аграрного образования для устойчивого развития отрасли: тренды и перспективы // Наука о человеке: гуманитарные исследования. 2018. № 4 (34). С. 81-89. EDN: YTVFKX
5. Воронин Б.А., Чупина И.П., Воронина Я.В. Развитие аграрной науки и аграрного образования: состояние, прогнозы // Russian Journal of Management. 2021. Т. 9, № 2. С. 26-30. <https://doi.org/10.29039/2409-6024-2021-9-2-26-30>
6. Польшакова Н.В., Александрова Е.В. Аграрное образование: вчера и сегодня // Современные наукоемкие технологии. 2021. № 11. Ч. 2. С. 396-401. <https://doi.org/https://doi.org/10.17513/snt.38946>

Информация об авторах

- ¹ Владимир Иванович Трухачев, академик РАН, д-р с.-х. наук, д-р экон. наук, профессор, ректор; rector@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4650-1893>
 - ² Елена Васильевна Хохлова, канд. пед. наук, доцент, проректор по учебной работе; e.hohlova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7608-5838>
 - ³ Елена Николаевна Кролевецкая, д-р пед. наук, доцент, профессор кафедры педагогики и психологии профессионального образования; kroleveczkaya@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1312-3638>
- ^{1,2,3} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, Тимирязевская ул., 49

Вклад авторов

В.И. Трухачев – формулирование основной концепции исследования;
Е.В. Хохлова – разработка методологии и формирование выводов исследования;
Е.Н. Кролевецкая – описание результатов исследования, создание черновика рукописи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 24.10.2024, после рецензирования и доработки 17.11.2024; принята к публикации 09.12.2024.

References

1. Berdnik-Berdychenko E.E., Pogrebach K.S. Strategic Guidelines for the Development of Higher Professional Education as an Innovative Potential of the National Economy. *Bulletin of the Russian New University. Series: Human and Society*. 2020;2:12-17. (In Russ.)
2. Blinov V.I. Strategic reference points of developing secondary vocational education. *Pedagogicheskiy Poisk*. 2020;7-8:2-7. (In Russ.)
3. Ryabchikova N.N. Prospects for the development of agricultural education in Russia: cooperation within the cluster-network approach. *Creative Economy*. 2020;14(4):529-540. (In Russ.)
4. Shumakova O.V., Mozhherina T.G. Modern model of continuous agrarian education for a sustainable development of the industry: trends and prospects. *The Science of Person: Humanities Researches*. 2018;4(34):81-89. (In Russ.)
5. Voronin B.A., Chupina I.P., Voronina Ya.V. Development of agrarian science and agrarian education: state, forecasts. *Russian Journal of Management*. 2021;2:26-30. (In Russ.)
6. Polshakova N.V., Aleksandrova E.V. Agrarian education: yesterday and today. *Modern High Technologies*. 2021;11(2):396-401. (In Russ.) <https://doi.org/https://doi.org/10.17513/snt.38946>

Author Information

- ¹ Vladimir I. Trukhachev, Rector, Full Member of the Russian Academy of Sciences, DSc (Ag), DSc (Econ), Professor; rector@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4650-1893>
 - ² Elena V. Khokhlova, First Vice-Rector – Vice-Rector for Education, CSc (Ed), Associate Professor; e.hohlova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7608-5838>
 - ³ Elena N. Krolevetskaya, Professor of the Department of Pedagogy and Psychology of Professional Education, DSc (Ed), Associate Professor; kroleveczkaya@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1312-3638>
- ^{1,2,3} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy;
¹²⁷⁴³⁴, Russian Federation, Moscow, Timiryazevskaya Str., 49

Author Contribution

V.I. Trukhachev – conceptualization;
E.V. Khokhlova – research methodology, conclusions;
E.N. Krolevetskaya – description of the research results, writing – original draft preparation.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests and are responsible for plagiarism

Received 24.10.2024; Revised 17.11.2024; Accepted 09.12.2024

К изданию принимается ранее не опубликованное автором (авторами) оригинальное произведение (научно-техническая или обзорно-аналитическая статья), соответствующее основным направлениям журнала объемом 3–4 тыс слов и оформленное согласно ГОСТ Р 7.0.7-2021.

Структура статьи (образец)

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК:

<https://doi.org/10.26897/2687-1149->

Название статьи (max до 15 слов, включает ключевые слова!)

Инициалы, фамилия первого автора¹, инициалы, фамилия второго автора²

¹ Название организации первого автора (в именительном падеже без составных частей названий организаций); страна, город

² Название организации второго автора; страна, город

¹ e-mail первого автора; [https://orcid.org/..](https://orcid.org/)

² e-mail первого автора; [https://orcid.org/..](https://orcid.org/)

Аннотация – самостоятельный законченный материал. Вводная часть минимальна. Нужно коротко и емко отразить актуальность и цель исследований, условия и схемы экспериментов, привести полученные результаты (с обязательным аргументированием на основании цифрового материала), сформулировать выводы. Нельзя использовать аббревиатуры и сложные элементы форматирования (например, верхние и нижние индексы) (объем 200 слов, включает ключевые слова!).

Ключевые слова: 7-10 слов или словосочетаний для поисковых систем и классификации статей по темам.

Финансирование. Сведения о грантах, финансировании.

Для цитирования: ФИО авторов. Название статьи // *Агроинженерия*. Год. Том. №. С. . <https://doi.org/10.26897/2687-1149->

© ФИО авторов, год

ORIGINAL ARTICLE

Article title

Full name¹, Full name²

¹ Name of the organization; full address; e-mail

² Name of the organization; full address; e-mail

¹ e-mail; [https://orcid.org/..](https://orcid.org/)

² e-mail; [https://orcid.org/..](https://orcid.org/)

Abstract.

Keywords:

Acknowledgments:

For citation: Full name of the authors. Article title. *Agricultural Engineering (Moscow)*. year; volume (number): pages. <https://doi.org/10.26897/2687-1149->

Статья должна быть структурирована, обязательно содержать следующие разделы:

- Введение (актуальность);
- Цель исследований;
- Материалы и методы;
- Результаты и их обсуждение;
- Выводы.

Библиографический список должен быть составлен в соответствии с последовательностью ссылок в тексте.

Информация об авторах

Вклад авторов

Требования к оформлению статьи

1. **Шрифт** Times New Roman, размер – 14 пт, интервал – 1,5. Буквы латинского алфавита выделяются курсивом, греческого и русского алфавитов, индексы и показатели степени, математические символы $\lim$, $\lg$, const , $\sin$, $\cos$, tg , $\min$, $\max$ и др. приводятся в прямом начертании. Аббревиатуры должны быть пояснены. Диапазон любых значений указать в виде многоточия («...»: 13,25...13,50), кроме периода лет, где используется дефис («-»: 5-6).

2. **Рисунки** (иллюстрации, графики, диаграммы, схемы) должны иметь качество 300 dpi для растровых изображений (например, фотографий), их обрезка должна производиться до вставки в документ. Каждый график, диаграмма или схема вставляется в текст как объект MS Excel. Наименования осей, единицы измерения физических величин и прочие надписи должны быть выполнены на русском и английском языке.

Рисунки должны иметь сквозную нумерацию, название и ссылку в тексте: (рис. 1). Каждый рисунок должен иметь подрисуночную подпись, в которой даётся объяснение всех его элементов.

3. **Таблицы** должны иметь сквозную нумерацию и заголовки. К таблицам и рисункам необходим англоязычный перевод подрисуночных подписей и заголовков. Сокращать слова в таблице не допускается.

4. Для набора **формул** необходимо использовать программы Math Type (в приоритете) либо Equation. Недопустимо вставлять уравнения в текст в виде растровых либо векторных изображений. Простые математические выражения, не содержащие дробей, корней, сложных индексов и т.д. (цифры и буквы (русские, латинские, греческие; знаки, имеющиеся в таблице символов), размещаются в тексте без использования специальных программ. Формулы должны создаваться одним объектом, а не состоять из частей. Править стили отдельных букв (приводить их к прямому начертанию) в уравнении, набранном в разрешённых программах, неприемлемо.

Формулы и уравнения печатаются с новой строки и центрируются. Все обозначения в формулах должны быть объяснены с указанием единиц измерения в системе СИ. Нумеровать следует только те формулы, на которые есть ссылки в тексте статьи.

5. **Список источников** к статье необходимо составлять в порядке цитирования, библиографическое описание – согласно ГОСТ Р 7.0.5-2008. Все ссылки должны быть оформлены единообразно: только с точкой, без тире между частями описания. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются. В тексте статьи ссылки на источник цитирования приводятся в квадратных скобках, в конце предложения перед точкой и размещаются последовательно в тексте статьи по мере упоминания. Названия цитируемых журналов приводятся полностью, без сокращений. Необходимо также при наличии указывать DOI цитируемой статьи.

Перевод названия статьи, ФИО, аффилиации, аннотации, ключевых слов и списка литературы должен выполняться качественно (механический перевод недопустим!)

Автор несёт ответственность за содержание статьи.

Статьи присылать по адресу: agroeng@rgau-msha.ru