



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

АГРОИНЖЕНЕРИЯ

Научный журнал

Том 28. № 3 / 2026

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. Горячина» 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. Лаверова
Перевод на английский язык –
А.Ю. Алипичев

Адрес редакции: 127434, Москва,
Тимирязевская ул., 58, к. 336
Тел.: +7 (499) 976-07-27
E-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 23.06.2026
Формат 60 84/8
Тираж 500 экз.

© ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА
имени К.А. Тимирязева, 2026

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

Редакционная коллегия:

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 Загинайлов, д-р техн. наук, профессор кафедры электроснабжения и электротехники имени академика И.А. Будяко, 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. Кожино 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 кафедры «Теоретическая электротехника», Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (г. Москва, Россия), <https://orcid.org/0000-0002-6929-3919>, v.storcheyov@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

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.avramenka@bsatu.by

Снежан Иванов Божков, канд. техн. наук, проф., Институт почвоведения, агротехнологий и защиты растений им. Н. Пушкарёва, 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



AGRICULTURAL ENGINEERING (MOSCOW)

Scientific Journal

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

Vol. 28(3)/2026

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
gosudarstvenniy agroinzhenernyi 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 23.06.2026

Format – 60 84/8

Circulation – 500 copies.

© Federal State Budgetary Establishment
of Higher Education – Russian State
Agrarian University – Moscow Timiryazev
Agricultural Academy, 2026

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>, oleonov@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

Editorial Board:

Nikolay V. Aldoshin, DSc (Eng), Professor, Federal State Budgetary Research Institution – Federal Scientific Agroengineering Center (VIM) (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), kazantsev@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. Kuprenko, 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>, kuprenkoai@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

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

Snezhan 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>, quanghoang1510@gmail.com

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ АПК

Г.Н. Самарин, В.В. Кирсанов, Е.А. Никитин, Р.А. Баишева Рекомендации по технологии приготовления и раздачи кормов для ферм крупного рогатого скота на основе технологических карт	4
А.А. Завалий, Н.В. Алдошин, С.С. Воложанинов, Д.Д. Волобуев Анализ тепловой эффективности обеззараживающего электродного нагрева почвы	17
А.И. Купреенко, Х.М. Исаев, Д.А. Безик, Д.А. Харченко, С.Х. Исаев Прогнозирование температуры теплоносителя в отопительной установке аэродинамического нагрева	27
В.Н. Ожерельев, В.В. Никитин, И.П. Адылин Сепарация свободного зерна посредством барабана-ускорителя зерноуборочного комбайна КЗС-1218	36
А.Л. Глушков, А.И. Бурков, В.А. Лазыкин, В.Ю. Мокиев Агротехническая оценка второй аспирации универсальной зерноочистительной машины	42
А.В. Букреев, А.К. Букреева Математическая модель электрохимической коррозии токоведущих элементов с учетом локальных параметров среды животноводческих комплексов	50
Д.А. Москвичев, А.В. Евграфов, А.С. Гузалов, Г.Е. Митягин, О.П. Андреев Экспериментальное обоснование энергосберегающих режимов работы комбинированного агрегата АКК-6 в лесостепной зоне ЦЧР	58
И.А. Старостин, А.В. Ещин, С.А. Давыдова Перспективные направления и прогноз применения альтернативной энергетики в сельскохозяйственных тракторах	65

ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕРВИС В АПК

В.И. Балабанов, Н.Н. Ивахненко, В.Г. Борулько, Д.В. Добряков, А.И. Кругляк, М.Ю. Бадекин Структура и состав медно-алюминиевых фрикционных покрытий для деталей машин	74
С.Л. Никитченко Интеллектуальная модель управления надежностью эксплуатируемой сельскохозяйственной техники	84
С.М. Гайдар, С.М. Ветрова, А.С. Барчукова Коррозионная активность минеральных удобрений и защитные свойства хелатного комплекса меди для сельскохозяйственной техники	94
О.А. Леонов, Н.Ж. Шкаруба, Д.А. Пупкова, Л.А. Гринченко, А.В. Чепурин, В.О. Леонов Проектирование комплексных калибров для контроля деталей шпоночных соединений при ремонте редукторов	103

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

А.В. Виноградова, А.В. Виноградов, Ю.Х. Шогенов Причины и последствия аварийных отключений в сельских электрических сетях 0,4 кВ	111
--	-----

ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

М.С. Бережная Формирование образовательных консорциумов «Аграрный вуз – НИИ – машиностроительное предприятие – агрохолдинг»: модели и практики	120
--	-----

CONTENTS

FARM MACHINERY AND TECHNOLOGIES

G.N. Samarin, V.V. Kirsanov, E.A. Nikitin, R.A. Baisheva Recommendations for feed preparation and distribution technologies used on cattle farms: a technological chart approach	4
A.A. Zavaliy, N.V. Aldoshin, S.S. Volozhaninov, D.D. Volobuev Analysis of thermal efficiency of disinfection electrode heating of the soil	17
A.I. Kupreenko, K.M. Isaev, D.A. Bezik, D.A. Kharchenko, S.K. Isaev Forecasting the temperature of the coolant in an aerodynamic heating system	27
V.N. Ozherelev, V.V. Nikitin, I.P. Adylin Separation of free grain using the accelerator drum of the KZS-1218 grain harvester	36
A.L. Glushkov, A.I. Burkov, V.A. Lazykin, V.Yu. Mokiev Agrotechnical evaluation of the second aspiration of a universal grain cleaning machine	42
A.V. Bukreev, A.K. Bukreeva Mathematical model of electrochemical corrosion of current-conducting elements considering local environmental parameters in livestock farms	50
D.A. Moskvichev, A.V. Evgrafov, A.S. Guzalov, G.E. Mityagin, O.P. Andreev Experimental justification of energy-saving operating modes of the combined unit AKK-6 in the forest-steppe zone of the Central Chernozem Region	58
I.A. Starostin, A.V. Eshchin, S.A. Davydova Promising trends and prospects for the use of alternative energy in agricultural tractors	65

TECHNICAL SERVICE IN AGRICULTURE

V.I. Balabanov, N.N. Ivakhnenko, V.G. Borulko, D.V. Dobryakov, A.I. Kruglyak, M.Yu. Badekin Structure and composition of copper-aluminum friction coatings	74
S.L. Nikitchenko Intelligent reliability management model for operated agricultural machinery	84
S.M. Gaidar, S.M. Vetrova, A.S. Barchukova Corrosion activity of mineral fertilizers and protective properties of a copper chelate complex for agricultural machinery	94
O.A. Leonov, N.Zh. Shkaruba, D.A. Pupkova, L.A. Grinchenko, A.V. Chepurin, V.O. Leonov Designing complex gauges for inspection of keyway joint parts when repairing reduction gears	103

POWER SUPPLY AND AUTOMATION OF AGRICULTURAL PRODUCTION

A.V. Vinogradova, A.V. Vinogradov, Yu.Kh. Shogenov Causes and consequences of emergency shutdowns in rural power grids of 0.4 kV	111
--	-----

THEORY AND METHODOLOGY OF PROFESSIONAL EDUCATION

M.S. Berezhnaia Establishing of educational consortia "University – Research Institute – Engineering Enterprise – Large Agro-Holding": models and practices	120
---	-----

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ АПК

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.152.3

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-3-4-16>

Рекомендации по технологии приготовления и раздачи кормов для ферм крупного рогатого скота на основе технологических карт

Г.Н. Самарин¹, В.В. Кирсанов², Е.А. Никитин³, Р.А. Баишева⁴^{1, 2, 3, 4} Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия¹ samaringn@yandex.ru; <http://orcid.org/0000-0002-4972-8647>² kirvv2014@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0003-2549-4070>³ evgeniy.nicks@yandex.ru; <http://orcid.org/0000-0003-0918-2990>⁴ rozamamedova@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0001-9145-4478>

Аннотация. Отсутствие оптимальных комплексных решений при выборе наиболее эффективной технологии приготовления и раздачи кормов на фермах крупного рогатого скота обуславливает необходимость разработки соответствующих рекомендаций. Исследования проведены с целью разработки рекомендаций по выбору оптимальной технологии приготовления и раздачи кормов КРС с учетом критерия минимизации эксплуатационных расходов, рассчитанных на основе технологических карт поточно-технологической линии приготовления и раздачи кормов для ферм с поголовьем до 1500 гол. и более. Рассмотрены три варианта технологии: первый – основной состав машин с прицепным миксером; второй – с роботизированным кормоцехом; третий – технология кормления КРС с самоходным миксером. Учитывали марки машин, выполняемые функции, количество задействованных единиц, вместимость бункера смесителя, количество обслуживаемых животных единицей техники за один цикл, равномерность дозирования, установленную мощность, тип энергетической установки и количество обслуживающего персонала. Разработанная в среде Microsoft Excel математическая модель поточно-технологической линии приготовления и раздачи кормов на фермах крупного рогатого скота позволила на основе технологических карт рассчитать технико-экономические показатели технологий приготовления и раздачи кормов. Представленная технологическая карта процесса приготовления и раздачи корма для КРС на фермах по производству молока включает в себя эксплуатационные расходы, капитальные вложения и затраты труда с учетом всех трех базовых технологий кормления. Наименьшие эксплуатационные расходы (прямые затраты) в 404,83 руб/т отмечены в технологии кормления КРС с самоходным миксером (вариант 3). Предлагаемые рекомендации и прикладная программа, выполненная в виде имитационной системы, позволят специалистам в режиме диалога с ЭВМ рассчитывать возможные последствия принимаемых решений, анализировать результаты и выбирать наилучший вариант проектируемого объекта.

Ключевые слова: технология кормления; технология кормления КРС; технологии приготовления и раздачи кормов; эксплуатационные расходы; технологическая карта; рекомендации

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (тема № FGUN-2025-0013).

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

Для цитирования: Самарин Г.Н., Кирсанов В.В., Никитин Е.А., Баишева Р.А. Рекомендации по технологии приготовления и раздачи кормов для ферм крупного рогатого скота на основе технологических карт // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 3. С. 4-16. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-3-4-16>

ORIGINAL ARTICLE

Recommendations for feed preparation and distribution technologies used on cattle farms: a technological chart approach

G.N. Samarin¹, V.V. Kirsanov², E.A. Nikitin³, R.A. Baisheva⁴✉

^{1, 2, 3, 4} Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Moscow, Russia

¹ samaringn@yandex.ru; <http://orcid.org/0000-0002-4972-8647>

² kirvv2014@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0003-2549-4070>

³ evgeniy.nicks@yandex.ru; <http://orcid.org/0000-0003-0918-2990>

⁴ rozamamedova@mail.ru✉; <http://orcid.org/0000-0001-9145-4478>

Abstract. Modern cattle farms face a shortage of optimal integrated solutions for selecting the most efficient feed preparation and distribution technologies, as well as a lack of well-founded recommendations for their implementation. The study therefore aimed to develop recommendations for choosing the optimal cattle feed preparation and distribution technology based on the criterion of minimizing operating costs. The costs were calculated using technological charts of the continuous production line for feed preparation and distribution on farms with a population of up to 1,500 heads or more. Three technological options were considered: Option 1 – a basic machine configuration with a trailed mixer; Option 2 – a configuration with a robotic feed preparation unit; Option 3 – cattle feeding technology with a self-propelled mixer. The evaluation took into account the following parameters: machine brands, functions performed, number of units involved, mixer hopper capacity, number of animals serviced per equipment unit per cycle, dosing uniformity, installed power, type of power unit, and number of maintenance personnel. A mathematical model of the continuous feed preparation and distribution line for cattle farms was developed using Microsoft Excel. This model enabled the calculation of technical and economic indicators for feed preparation and distribution technologies based on technological charts. The technological chart of the feed preparation and distribution process used on dairy cattle farms encompasses operating costs, capital investments, and labor costs for all three basic feeding technologies. The lowest operating costs (direct costs) – 404.83 rubles per ton – were recorded for cattle feeding technology with a self-propelled mixer (Option 3). The proposed recommendations, along with the application software designed as a simulation system, will enable specialists to calculate the possible consequences of their decisions through direct computer interaction, analyze the results, and select the most suitable option for the facility being designed.

Keywords: feeding technology; cattle feeding technology; feed preparation and distribution technologies; operating costs; technological chart; recommendations

Funding. The research was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM (theme No. FGUN-2025-0013).

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

For citation: Samarin G.N., Kirsanov V.V., Nikitin E.A., Baisheva R.A. Recommendations for feed preparation and distribution technologies used on cattle farms: a technological chart approach. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(3):4-16. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-3-4-16>

Введение

В структуре себестоимости производства молока в России по среднестатистическим данным 60% составляет стоимость кормов, 30% – электроэнергия, ГСМ и прочие затраты и около 10% – зарплата сотрудников¹ [1, 2].

Основными технологическими операциями приготовления и раздачи корма КРС на ферме являются хранение, погрузка, дозирование, перемешивание, транспортировка, раздача, контроль и стимуляция

поедания корма [3, 4]. Критериями эффективного кормления считаются доступность корма и возможность дозирования минеральных добавок [5, 6].

Часто на агропредприятиях для приготовления кормов применяются устаревшие технологии и оборудование, и функционирование имеющегося зарубежного оборудования является неэффективным. При этом восстановление его рабочего состояния затруднительно в связи с ограничением поставок запасных частей [7].

Дефицит комплексных решений по кормоприготовлению, хранению, раздаче и транспортировке кормов сказывается на качестве кормосмесей [8, 9].

¹ Сельское хозяйство в России. 2023: Статистический сборник Росстата / Под ред. И.В. Васильева. М.: Федеральная служба государственной статистики, 2023. 103 с.

Решить данную проблему позволит разработка рекомендаций по технологии приготовления и раздачи кормов для ферм крупного рогатого скота на основе технологических карт.

Цель исследований: разработка рекомендаций по технологии приготовления и раздачи кормов для ферм крупного рогатого скота на основе технологических карт, позволяющих выбрать оптимальный вариант технологии по критерию эксплуатационных расходов.

Материалы и методы

Базовые варианты технологий кормления КРС на молочных фермах рассмотрены нами в работе [10]. Система машин по трем основным технологиям кормления КРС на молочных фермах от 400 до 1500 гол. представлена в таблице 1. Первая технология включает в себя основной состав машин с прицепным миксером (рис. 1а). Смешивание объемистых и концентрированных кормов целесообразно проводить в смесителе-раздатчике с автономной системой погрузки для снижения затрат на эксплуатацию техники² [11, 12]. Во второй технологии с роботизированным кормоцехом для поголовья до 1500 гол. (рис. 1б) операции хранения и дозирования объемистых концентрированных кормов и минеральных добавок обеспечивают приготовление качественного корма. Третья технология кормления КРС – с самоходным миксером (рис. 1в).

Задача оптимизации экономических параметров поточно-технологической линии приготовления и раздачи кормов животным в математическом плане сводится к поиску минимального значения принятой целевой функции – удельных приведенных затрат поточно-технологической линии приготовления и раздачи кормов животным $\Pi З'$ [13]:

$$\Pi З' = \Pi З + E_n + \sum_{i=1}^n K B_i \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $\Pi З$ – удельные прямые затраты поточно-технологической линии приготовления и раздачи кормов животным, руб/ц; E_n – нормативный коэффициент капитальных вложений³, $E_n = 0,15$; $\sum_{i=1}^n K B_i$ – суммарные удельные капиталовложения в технологический процесс, руб/ц;

²Ерохин М.Н., Скороходов Д.М., Павлов А.С. Импорт-замещение рабочих органов сельскохозяйственных машин для животноводства // Международная научная конференция молодых ученых и специалистов, посвященная 180-летию со дня рождения К.А. Тимирязева: Сборник статей. М.: Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, 2023. С. 557-561. EDN: DZZRWD

³Методические рекомендации по определению экономической эффективности и использования в сельском хозяйстве капитальных вложений и новой техники. Л.: НИПТИМЭСХНЗ, 1986. 58 с.

$$\Pi З = \sum_{i=1}^n \Pi З_i = \frac{З_к + З_{зп} + З_а + З_{то} + З_{тэ}}{ВП}, \quad (2)$$

где $З_к$ – затраты на корм животным за период получения валовой продукции ВП, руб.; $З_{зп}$ – заработная плата обслуживающего персонала поточно-технологической линии приготовления и раздачи кормов животным за период получения валовой продукции ВП, руб.; $З_а$, $З_{то}$, $З_{тэ}$ – отчисления на амортизацию и техническое обслуживание, затраты на топливо и электроэнергию при работе технологического оборудования поточно-технологической линии приготовления и раздачи кормов животным за период получения валовой продукции ВП, соответственно, руб.; ВП – валовая продукция, полученная за период работы с поточно-технологической линии приготовления и раздачи кормов животным, ц;

$$З_к = \sum P_к \cdot C_{тк1}, \quad (3)$$

где $\sum P_к$ – суммарный расход корма на животных за период получения валовой продукции ВП, к.ед.; $C_{тк1}$ – удельная стоимость корма, руб/к.ед.;

$$З_{зп} = З_т \cdot C_{тч}, \quad (4)$$

где $З_т$ – затраты труда на обслуживание поточно-технологической линии приготовления и раздачи кормов животным за период получения валовой продукции ВП, чел.-ч; $C_{тч}$ – часовая тарифная ставка обслуживающего персонала по данным хозяйства, руб/чел.-ч.

$$З_{тэ} = \sum P_{тэ} \cdot C_{ттэ1}, \quad (5)$$

где $\sum P_{тэ}$ – суммарный расход электроэнергии (топлива) поточно-технологической линии приготовления и раздачи кормов животным за период получения валовой продукции ВП, кВт·ч (кг); $C_{ттэ1}$ – удельная стоимость электроэнергии (топлива) по данным хозяйства, руб/кВт·ч (руб/кг);

$$ВП = \prod_{i=1}^n K_{\Pi i} \cdot \Pi_{\Pi} \rightarrow \max, \quad (6)$$

где $\prod_{i=1}^n K_{\Pi i}$ – произведение коэффициентов, учитывающее влияние параметров поточно-технологической линии приготовления и раздачи кормов животным на плановую продуктивность животного; Π_{Π} – плановая продуктивность животного с учетом генетического потенциала за период работы поточно-технологической линии приготовления и раздачи кормов, ц.

Результаты и их обсуждение

На основе существующих базовых поточно-технологических линий приготовления и раздачи кормов на фермах КРС разработана программа расчета на ПЭВМ, которая на основе метода последовательного анализа вариантов позволяет оптимизировать

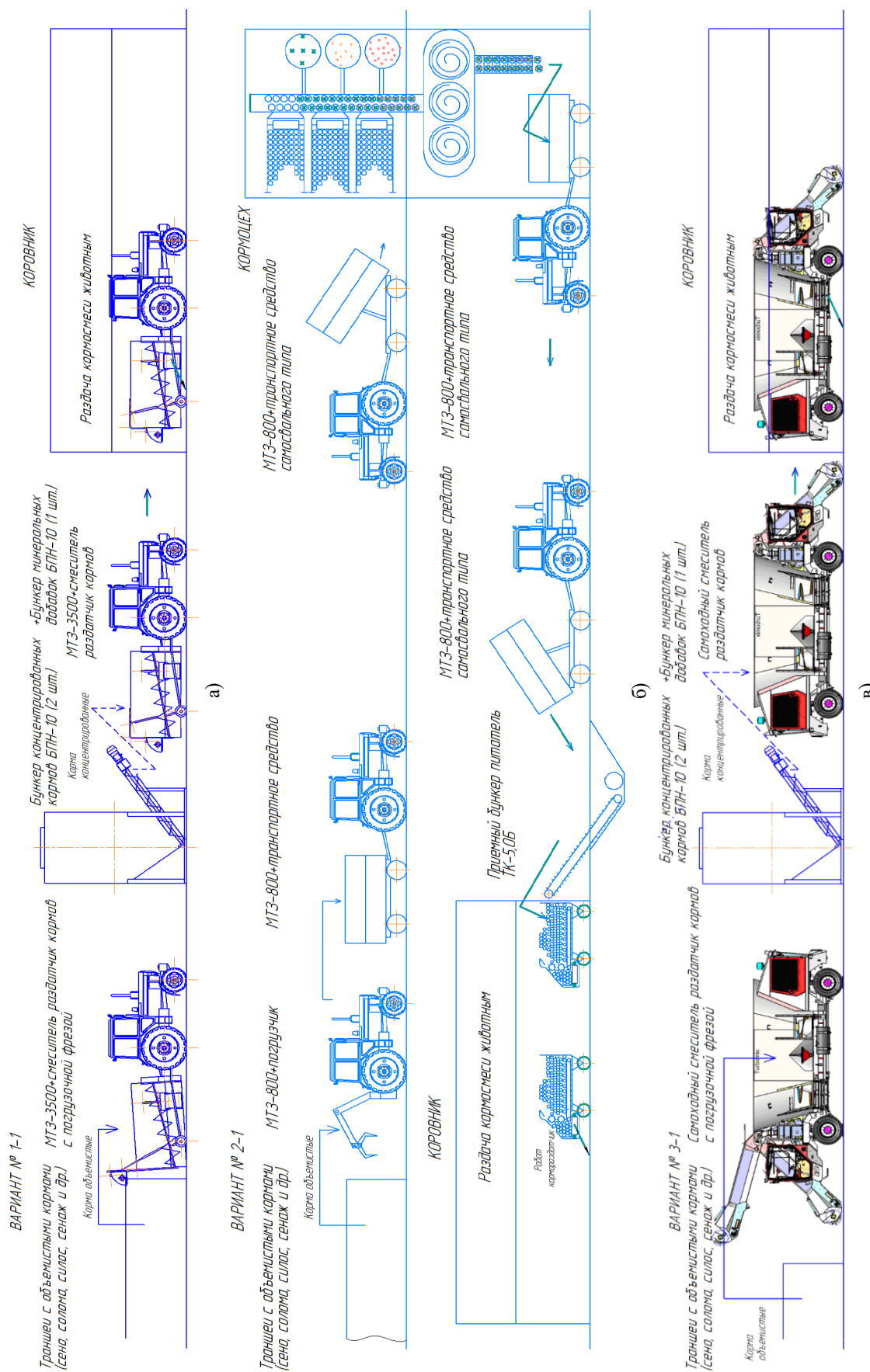


Рис. 1. Технологическая схема:

а – вариант № 1 со смесителем-раздатчиком кормов с погрузочной фрезой; б – вариант № 2 с кормоцеком и роботом кормораздатчиком;

в – вариант № 3 с самоходным смесителем-раздатчиком кормов с погрузочной фрезой

Fig. 1. Process diagram:

a – Option No. 1 with a trailed mixer-dispenser / feed mixer wagon with a loading auger; б – Option No. 2 with a feed preparation unit and a robotic feed dispenser;

с – Option No. 3 with a self-propelled feed mixer wagon with a loading auger

Таблица 1

Table 1

Система машин по основным технологиям кормления КРС на молочных фермах на 400...1500 гол.

A system of machines for basic cattle feeding technologies used on dairy farms with 400 to 1,500 cattle heads

Показатель	Технология № 1 с прицепным миксером				Технология № 2 с роботизированным кормоцехом							Технология № 3 с самоходным миксером	
	Смеситель-раздатчик кормов	Погрузчик телескопический	Трактор, агрегирующий смеситель-раздатчик кормов	Накопительный бункер концентрированных кормов, типа БПН	Наклонные транспортеры-дозаторы объемистых кормов	Накопительный бункер концентрированных кормов, типа БПН	Стационарный смеситель кормов	Колесный робот-раздатчик кормов	Погрузчик телескопический	Полуприцеп специальный	Трактор	Самосходный смеситель-раздатчик кормов	Накопительный бункер концентрированных кормов, типа БПН
Марка	PFT MCF 35 (РФ)	JCB527-58 AGRI (Англия)	MTЗ 3500 (РБ)	БПН 10 (РФ)	Comall Belt Conveyor Feeding (Дания)	БПН 10 (РФ)	PFT MCF 2-14-S (РФ)	Jeantill Automatic Feeding (Франция)	JCB527-58 AGRI (Англия)	ПС-45	MTЗ 800/	Siloking Selfline 30 (Германия)	БПН-10 (РФ)
Выполняемые операции	Смешивание, раздача корма	Погрузка компонентов кормовой смеси	Транспортировка, агрегатирование с раздатчиком кормов	Хранение и дозирование концентрированных кормов и минеральных добавок	Кратковременное хранение и дозирование объемистых кормов	Хранение и дозирование концентрированных кормов и минеральных добавок	Смешивание компонентов кормовой смеси	Раздача, подталкивание кормовой смеси к отяжелению кормового стога, дозирование минеральных добавок	Погрузка объемистых кормов из силосной траншеи в полуприцеп специализированных ПС-4	Транспортировка объемистых кормов из хранилища в наклонные транспортеры-дозаторы объемистых кормов	Погрузка и измельчение компонентов кормовой смеси, смешивание, транспортировка и раздача кормовой смеси	Погрузка и дозирование концентрированных кормов и минеральных добавок	
Количество задействованных единиц	1	1	1	3 (определяется количеством рецептур комбикормов предприятия)	3 (определяется количеством используемых объемистых кормов)	3 (определяется количеством рецептур комбикормов предприятия)	1	1	1	1	1	1	3
Вместимость бункера-смесителя, м³	35	1,5 (ковш)	–	10	55	10	14	3	1,5	45	–	30	10
Количество обслуживаемых животных единицей техники за один цикл, гол.	650	–	–	860	1000	860	100	50 (при двухразовом кормлении)	–	–	–	1500	860
Равномерность дозирования, %	70	–	–	90	70	90	70	75	–	–	–	75	90
Установленная мощность, кВт	–	75	235	5	15	5	55	12	75	–	58	200	5
Энергетическая установка, тип	–	ДВС	ДВС	ЭД	ЭД	ЭД	ЭД	ЭД (Аккумуляторная система питания)	ДВС	–	ДВС	ДВС	ЭД
Обслуживающий персонал, чел.	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Примечание. ДВС – двигатель внутреннего сгорания; ЭД – электродвигатель.

техничко-экономические показатели различных технологий приготовления и раздачи кормов на фермах крупного рогатого скота. В качестве среды программирования используется Microsoft Excel. Прикладная программа, выполненная в виде имитационной системы, позволяет специалистам в режиме диалога с ЭВМ рассчитывать возможные последствия принимаемых решений, анализировать результаты и вырабатывать наилучший вариант проектируемого объекта (рис. 2).

Один из вариантов расчета затрат на приготовление и раздачу кормов по трем рассматриваемым технологиям представлен на рисунке 3.

Приведем расчет затрат на операцию «Погрузка объемистых кормов в транспортное средство»^{4,5} (столбец № 3), осуществляемой в течение всего стойлового периода, то есть в течение года, $n = 365$ дней.

Согласно технологической карте (рис. 2) суточный объем объемистых кормов (столбец № 4) $Q_{\text{сут}} = 36,62$ т/сут. определяется согласно принятому рациону кормления дойной коровы (табл. 2).

Годовой объем работ (столбец № 5) определяем перемножением значений ячеек столбцов 3 и 4:

$$Q_{\text{год}} = Q_{\text{сут}} \cdot n = 36,62 \cdot 365 = 13366,5 \text{ т / год} \quad (7)$$

Техническое оснащение процесса (столбец № 6) осуществляется с помощью телескопического погрузчика JCB527-58 AGRI, который установлен на тракторе марки МТЗ (Беларус) 800.

Численность сотрудников для обслуживания машины (столбец № 7) – 1 тракторист, $n_{\text{ч}} = 1$.

Производительность машины в час (столбец № 8) рассчитывается или дается в технической характеристике, $W_{\text{м}} = 80$ т / ч [13].

Время работы машины на данной операции (столбец № 9) определяется по формуле:

$$t = \frac{Q_{\text{сут}}}{W_{\text{м}} \cdot n_{\text{м}}}, \quad (8)$$

$$t = \frac{36,62}{80 \cdot 1} = 0,458 \text{ ч} < t_{\text{см}} = 7 \text{ ч},$$

где $n_{\text{м}}$ – число машин, принимаем $n_{\text{м}} = 1$; $t_{\text{см}}$ – время смены, ч ($t_{\text{см}} = 8$ ч).

Мощность двигателя трактора (столбец № 10) определяется согласно технической характеристике, $N = 58$ кВт.

⁴ Мирзоянц Ю.А. Механизация производства продукции животноводства: Учебное пособие по выполнению курсового и дипломного проектирования для студентов инженерного факультета. Великие Луки, 2000. 164 с.

⁵ Мирзоянц Ю.А., Самарин Г.Н., Загорский С.М., Белов А.В., Уварова Н.П. Механизация кормоприготовления: Лабораторный практикум. Великие Луки, 2004. 181 с.

Расход электроэнергии (столбец № 11) вычисляется по формуле [13]:

$$P = N \cdot t \cdot n_{\text{м}} = 58 \cdot 0,458 \cdot 1 = 26,55 \text{ кВт} \cdot \text{ч}. \quad (9)$$

Количество машин (столбец № 12) устанавливается согласно ранее принятому условию в столбце № 9, $n_{\text{м}} = 1$.

Балансовая стоимость машины (столбец № 13) определяется по формуле:

$$B_{\text{м}} = B_0 \cdot (1 + g + \mu) \cdot \eta, \quad (10)$$

где B_0 – цена трактора и машины согласно прайс-листу ($B_{\text{отр}} = 2734400$ тыс. руб., $B_{\text{ом}} = 7421200$ тыс. руб.); g – коэффициент учета расходов на транспортировку машины или оборудования ($g = 0,13$) [13]; μ – коэффициент учета затрат на монтаж машины или оборудования ($\mu = 0,15$) [13], η – коэффициент использования данной машины или оборудования;

$$\eta = (t \cdot n) / t_{\text{план}}, \quad (11)$$

где $t_{\text{план}}$ – годовая плановая нагрузка, ч (на трактор $t_{\text{план}} = 1900$ ч, на машину $t_{\text{план}} = 800$ ч) [13].

Тогда суммарная балансовая стоимость составит:

$$B_{\text{м}} = B_{\text{мтр}} + B_{\text{мм}} = 307781 + 1984100 = 2291881 \text{ руб.} \quad (12)$$

Размер капиталовложений (столбец № 14) определяется по формуле:

$$K = B_{\text{м}} \cdot n_{\text{м}} = 2291881 \cdot 1 = 2291881 \text{ руб.} \quad (13)$$

Затраты труда на операцию в сутки (столбец № 15) –

$$Z_{\text{т}} = t \cdot n_{\text{ч}} = 0,46 \cdot 1 = 0,46 \text{ чел.} \cdot \text{ч / сут} \quad (14)$$

Затраты труда на операцию за год (столбец № 16):

$$Z_{\text{год}} = Z_{\text{т}} \cdot n = 0,46 \cdot 365 = 167,1 \text{ чел.} \cdot \text{ч / год} \quad (15)$$

Зарплата производственным рабочим на операцию в сутки (столбец № 17) определяется по формуле:

$$Z_{\text{п}} = Z_{\text{т}} \cdot C_{\text{тч}}, \quad (16)$$

где $C_{\text{тч}}$ – часовая тарифная ставка, руб/ч ($C_{\text{тч}} = 478$ руб/ч) [13];

$$Z_{\text{п}} = 0,46 \cdot 478 = 218,81 \text{ руб.}$$

Столбец № 18 учитывается в столбцах 19 и 20.

Амортизационные отчисления на восстановление и капитальный ремонт (столбец № 19) определяются по формуле:

$$A_0 = \frac{(B_{\text{отр}} \cdot H_{\text{отр}} + B_{\text{ом}} \cdot H_{\text{ом}}) \cdot n_{\text{м}}}{100 \cdot n}, \quad (17)$$

где H_0 – норма амортизационных отчислений ($H_{\text{отр}} = 12,5\%$, $H_{\text{ом}} = 20,0\%$); n – количество дней работы на данной операции, дн ($n = 365$ дн);



Рис. 2. Фрагмент расчета технологической карты приготовления и раздачи кормов на фермах крупного рогатого скота на 1000 гол. в программе Excel

1. Вид животных на ферме: а). Дойные коровы – 1000

2. Годовой надой 8000 кг на корову

3. Система и способ содержания беспривязная

4. Суточный рацион на 1 гол., кг

Корма	Вид животных				Суточная потребность в кормах, т
	Дойные коровы				
Силос кукурузный	20				20,07
Сенаж злаковых культур	16				16,05
Солома овсяная	0,5				0,50
Зерно кукурузы	4				4,00
Шрот рапсовый	3,5				3,50
Шрот соевый	0,5				0,50
Шрот подсолнечный	1				1,00
Ячмень	1,5				1,50
Комплексная минеральная добавка	0,25				0,25
ИТОГО	47,25				47,38

5. Продолжительность смены 8 часов

6. Кратность кормления животных 2

7. Кратность доения 2

8. Продолжительность стойлового периода 365 дней

9. Приготовление корма за стойловый период 17292,2 т

Затраты	Вариант технологии		
	1	2	3
10. Затраты труда на 1 т продукции, чел.-ч	0,073	0,35	0,053
11. Эксплуатационные расходы на 1 т продукции, руб.	536,59	784,74	404,83

Рис. 3. Технологическая карта производства продукции животноводства на молочно-товарной ферме (технологии № 1, 2, 3)

Fig. 3. Technological chart of livestock production on a dairy farm (Technologies No. 1, 2, 3)

Таблица 2

Суточный рацион кормления дойной коровы с годовым надоем не менее 8000 кг на 1 гол.

Table 2

Daily feeding ration for a dairy cow with an annual milk yield of at least 8,000 kg per head

Наименование компонента		Норма выдачи корма на дойную корову, кг/гол/сут.	Масса корма для 1000 гол. дойного стада, кг/сут.	Коэффициент, учитывающий перевалку	Коэффициент, учитывающий выбраковку при длительном хранении	Масса корма для 1000 гол. дойного стада с учетом технологических коэффициентов, кг/сут.
Объемистые корма	Силос кукурузный	20	20000	1,0015	1,0018	20066
	Сенаж злаковых культур	16	16000	1,0015	1,0018	16053
	Солома овсяная	0,5	500	1,0015	1,0018	502
Концентрированный комбикорм	Зерно кукурузы	4	4000	1,0005	1	4002
	Шрот рапсовый	3,5	3500	1,0005	1	3502
	Шрот соевый	0,5	500	1,0005	1	500
	Шрот подсолнечный	1	1000	1,0005	1	1001
	Ячмень	1,5	1500	1,0005	1	1501
Кормовые добавки	Комплексная минеральная добавка	0,25	250	1,0005	1	250
Итого		47,25	47250			47376

$$A = \frac{(307781 \cdot 12,5 + 1984100 \cdot 20,0) \cdot 1}{100 \cdot 365} =$$

1192,6 руб.

Отчисления на текущий ремонт и техническое обслуживание (столбец № 20) определяются по формуле:

$$A_{\text{тр}} = \frac{(B_{\text{ТРТР}} \cdot H_{\text{ТРТР}} + B_{\text{ТРМ}} \cdot H_{\text{ТРМ}}) \cdot n_{\text{м}}}{100 \cdot n}, \quad (18)$$

где $H_{\text{ТР}}$ – средняя норма отчислений на текущий ремонт и техническое обслуживание ($H_{\text{ТР ТР}} = 5\%$, $H_{\text{ТР М}} = 14\%$);

$$A_{\text{тр}} = \frac{(307781 \cdot 5 + 1984100 \cdot 14,0) \cdot 1}{100 \cdot 365} =$$

= 803,2 руб.

Затраты на электроэнергию и топливо (столбец № 21) при тарифе 1 кВт·ч = 8,37 руб. определяются по формуле:

$$C_{\text{эл}} = P \cdot 8,37 \cdot n_{\text{м}} =$$

$$= 26,55 \cdot 8,37 \cdot 1 = 222,22, \text{ руб.} \quad (19)$$

Эксплуатационные расходы на операцию за сутки (столбец № 22) определяются по формуле:

$$U_{\text{сут}} = 3_{\text{п}} + A_{\text{с}} + A_0 + A_{\text{ТР}} + C_{\text{эл}} =$$

$$= 218,81 + 1192,6 + 803,2 + 222,2 = 6436,8 \text{ руб.} \quad (20)$$

Эксплуатационные расходы на операцию по ферме в год (столбец № 23) –

$$U_{\text{год}} = U_{\text{сут}} \cdot 365 = 889428 \text{ руб.} \quad (21)$$

В представленной технологической карте процесса приготовления и раздачи корма для КРС на фермах по производству молока (табл. 3) рассчитаны эксплуатационные расходы, капитальные вложения, затраты труда с учетом всех трех базовых технологий кормления. Основные технико-экономические показатели операций приготовления и раздачи корма представлены в таблице 4.

Из данных таблицы 4 следует, что наименьшие эксплуатационные расходы (прямые затраты) 404,83 руб/т – при использовании технологии кормления КРС с применением самоходного миксера (вариант № 3).

Таблица 3

Технологическая карта процесса приготовления и раздачи корма на ферме КРС

Table 3

Technological chart of feed preparation and distribution on a cattle farm

№п/п	Наименование операции технологического процесса	Количество дней работы на данной операции в год	Суточный объем работ на ферме, т, гол.	Годовой объем работ на ферме, т, гол.	Техническое оснащение процесса (агрегат, машина). Способ выполнения операции	Количество обслуживающего персонала на 1 машину, операцию, чел.	Часовая производительность машины, т/ч, м³/ч	Количество часов работы машины в сутки	Расход энергии	
									Мощность привода, кВт	Расход электроэнергии, кВт·ч
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Технология кормления КРС с прицепным миксером (№ 1)										
1	Погрузка объемистых кормов, т	365	36,62	13366,5	МТЗ-3500+PFT MCF 35 с погрузочной фрезой	1	80	0,458	58	26,55
2	Транспортировка объемистых кормов на расстояние 0,4 км, т-км	365	14,65	5346,6	МТЗ-3500+PFT MCF 35 с погрузочной фрезой	1	30	0,488	235	114,74
3	Приемка концентрированных комбикормов и подача, т	365	10,51	3834,42	Бункер БПН-10		40	0,263	5	1,31
4	Подача комплексных минеральных добавок, т	365	0,25	91,2956	Бункер БПН-10		20	0,013	2,2	0,03
5	Транспортировка кормосмеси до фермы на расстояние 0,6 км, т-км	365	28,43	10375,3	МТЗ-3500+PFT MCF 35 с погрузочной фрезой	1	30	0,948	235	222,67
6	Раздача кормосмеси на ферме, т	365	47,38	17292,2	МТЗ-3500+PFT MCF 35 с погрузочной фрезой	1	30	1,579	235	371,11
	ИТОГО									

Продолжение табл. 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Технология кормления КРС с роботизированным кормоцехом (№ 2)										
1	Погрузка объемистых кормов, т	365	36,62	13366,5	MT3-800+JCB527-58 AGRI	1	80	0,458	58	26,55
2	Транспортировка объемистых кормов на расстояние 0,4 км, т-км	365	14,65	5346,6	MT3-800+ПС-45	1	30	0,488	58	28,32
3	Приемка в питатель и подача объемистых кормов, т	365	36,62	13366,5	Cormall Belt Conveyor Feeding	1	3	12,20	15	183,10
4	Приемка концентрированных комбикормов и подача, т	365	10,51	3834,4	Бункер БПН-10		40	0,263	5	1,31
5	Подача комплексных минеральных добавок, т	365	0,25	91,3	Бункер БПН-10		20	0,013	2,2	0,03
6	Подача корма на смешивание, т	365	47,38	17292,2	ТС-40М		40	1,184	4	4,74
7	Смешивание кормов, т	365	47,38	17292,2	PFT MCF 2-14-S		20	2,369	55	130,28
8	Выгрузка кормосмеси в транспортное средство, т	365	47,38	17292,2	ТС-40М		40	1,184	4	4,74
9	Транспортировка кормосмеси до фермы на расстояние 0,6 км, т-км	365	28,426	10375,3	MT3-800+ПС-45	1	30	0,948	58	54,96
10	Перегрузка кормосмеси в робот раздатчик кормов, т	365	47,38	17292,2	ТК-5.0Б		5	9,475	6	284,26
11	Раздача кормосмеси на ферме, т	365	47,38	17292,2	Робот кормораздатчик	1	20	2,369	12	142,13
12	Строительство кормоцеха									
	ИТОГО									
Технология кормления КРС с самоходным миксером (№ 3)										
1	Погрузка объемистых кормов, т	365	36,62	13366,5	Siloking SelfLine 30 с погрузочной фрезой	1	80	0,458	200	91,55
2	Транспортировка объемистых кормов на расстояние 0,4 км, т-км	365	14,65	5346,6	Siloking SelfLine 30	1	90	0,163	200	32,55
3	Приемка концентрированных комбикормов и подача, т	365	10,51	3834,42	Бункер БПН-10		40	0,263	5	1,31
4	Подача комплексных минеральных добавок, т	365	0,25	91,2956	Бункер БПН-10		20	0,013	2,2	0,03
5	Транспортировка кормосмеси до фермы на расстояние 0,6 км, т-км	365	28,43	10375,3	Siloking SelfLine 30	1	90	0,316	44,1	13,93
6	Раздача кормосмеси на ферме, т	365	47,38	17292,2	Siloking SelfLine 30	1	30	1,579	58,8	92,86
	ИТОГО									

Окончание табл. 3

№ п/п	Капиталовложения			Затраты труда, чел.-ч		Эксплуатационные расходы, руб.						
	Необходимое количество машин и оборудования	Балансовая стоимость машин, руб.	Капиталовложения в процесс, руб.	в сутки	в год	По элементам на ферму в сутки					Всего за операцию в сутки	На ферму в год
						Зарплата производ- ственным рабочим	Суммарные издержки на трактора	Отчисления на машины и оборудование фермы		ГСМ, электроэнергия, топливо и пр. расходы		
Амортиза- ция	Текущий ремонт и техниче- ский уход											
1	12	13	14	15	16	17	18**	19	20	21	22	23
Технология кормления КРС с прицепным миксером (№ 1)												
1	1	1480779* 1942320	3423099	0,46	167,1	218,81		1571,4	947,8	222,2	2960,3	1080501
2	1	1579498* 2071808	3651306	0,49	178,2	233,39		1250,4	1011,0	960,4	3455,3	1261180
3	2	420000	840000					191,0	161,1	11,0	363,1	132532
4	1	420000	420000					191,0	161,1	0,23	352,3	128604
5	1	3065090* 4020439	7085529	0,95	345,8	452,91		3252,7	1962,0	1863,7	7531,3	2748912
6	1	4378700* 5743485	10122185	1,35	494,1	647,02		4646,7	2802,8	2662,5	10759,0	3927017
			25542119		1185,2	1552,14		11103,2	7045,8	5720,04	25421,22	9278746
Технология кормления КРС с роботизированным кормоцехом (№ 2)												
1	1	307781* 1984089,9	2291871	0,46	167,1	218,81		1192,6	803,2	222,2	2436,8	889428
2	1	328300* 412133,8	740434	0,49	178,2	233,39		338,3	248,2	237,0	1056,9	385771
3	3	5700000	17100000	12,21	4455,5	5834,87		2592,3	2186,3	1532,6	12146,1	4433317
4	2	420000	840000					191,0	161,1	11,0	363,1	132532
5	1	420000	420000					191,0	161,1	0,2	352,3	128604
6	1	400000	400000					181,9	153,4	39,7	375,0	136874
7	1	5200000	5200000					2364,9	1994,5	1090,5	5449,9	1989223
8	1	300000	300000					136,4	115,1	39,7	291,2	106274
9	1	637081* 799764,8	1436846	0,95	345,8	452,91		656,4	394,0	460,0	1963,3	716616
10	5	900000	4500000	0,00	0,0	0,00		409,3	345,2	2379,2	3133,7	1143815
11	5	7000000	35000000	2,37	864,6	1132,28		3835,6	3452,1	1189,6	9609,6	3507491
12			32635000									
			100864151		6011,3	7872,28		12089,8	10014	7201,6	37177,9	13569946
Технология кормления КРС с самоходным миксером (вариант № 3)												
1	1	3037841	3037841	0,46	167,1	218,81		1664,6	1165,2	766,3	3814,9	1392425
2	1	1080121	1080121	0,16	59,4	77,80		369,9	414,3	272,5	1134,5	414075
3	2	420000	840000					191,0	161,1	11,0	363,1	132532
4	1	420000	420000					191,0	161,1	0,2	352,3	128604
5	1	2096026	2096026	0,32	115,3	150,97		1148,5	804,0	116,6	2220,0	810306
6	1	10480129	10480129	1,58	576,4	754,86		5742,5	4019,8	777,2	11294,4	4122448
			17954116		918,2	1202,43		9307,5	6725,4	1943,8	19179,2	7000390

*Указана балансовая стоимость энергетического средства (трактора) и агрегируемой машины, руб.

** Столбец № 18 учитывается в столбцах 19 и 20.

Таблица 4

Основные технико-экономические показатели технологий приготовления и раздачи кормов на фермах крупного рогатого скота

Table 4

Main technical and economic indicators of feed preparation and distribution technologies used on cattle farms

Показатель	Технология № 1 (прицепной миксер)	Технология № 2 (роботизированный кормопех)	Технология № 3 (самоходный миксер)
Валовое производство корма, т/год	17292,21		
Эксплуатационные расходы (прямые затраты) по элементам на ферму в сутки, руб/т	536,59	784,74	404,83
в том числе зарплата производственным рабочим	32,76	166,17	25,38
отчисления на амортизацию машины и оборудование фермы	234,36	255,19	196,46
отчисления на текущий ремонт и техническое обслуживание машины и оборудование фермы	148,72	211,38	141,96
ГСМ, электроэнергия, топливо и прочие расходы	120,74	152,01	41,03
Затраты труда, чел.-ч/год	0,073	0,35	0,053

Выводы

1. Рассмотрены три варианта технологии приготовления и раздачи кормов на фермах крупного рогатого скота: 1) со смесителем-раздатчиком кормов с погрузочной фрезой; 2) с кормопехом и роботом-кормораздатчиком; 3) с самоходным смесителем-раздатчиком кормов с погрузочной фрезой.

2. Разработанная программа и методические рекомендации позволили рассчитать

технико-экономические показатели трех технологий приготовления и раздачи кормов и по критерию минимизации эксплуатационных затрат на технологический процесс выбрать наиболее оптимальную технологию. Минимальные эксплуатационные затраты получены в технологии с самоходным смесителем-раздатчиком кормов Siloking SelfLine 30 с погрузочной фрезой (вариант № 3).

Список источников

1. 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>
2. Анищенко А.Н., Шутьков А.А. Проблемы реализации Доктрины продовольственной безопасности России // Продовольственная политика и безопасность. 2021. Т. 8, № 1. С. 9-22. <https://doi.org/10.18334/ppib.8.1.111777>
3. Булгаков А.М., Булгакова Д.А., Мотовилов К.Я. и др. Особенности кормления полнорационными кормовыми смесями дойного стада при привязном содержании коров // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2024. № 7 (237). С. 42-49. <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2024-237-7-42-49>
4. Никитин Е.А. Техничко-технологический анализ систем приготовления кормовой смеси для КРС // Инновации в сельском хозяйстве. 2019. № 2 (31). С. 53-61. EDN: XWXOEW
5. Столярова О.А., Решетникова Ю.В. Развитие кормовой базы молочного скотоводства // Сурский вестник. 2022. № 3 (19). С. 96-99. EDN: MKUBCF
6. Михайличенко С.М., Купренко А.И. Автоматизация процессов приготовления и раздачи рационов кормления на фермах КРС // Техника и технологии в животноводстве. 2023. № 1 (49). С. 11-19. EDN: IERSCV
7. Ценч Ю.С. Научно-технический потенциал как главный фактор развития механизации сельского хозяйства // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2022. Т. 16, № 2. С. 4-13. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-2-4-13>

References

1. Lobachevskiy Ya.P., Dorokhov A.S. Digital technologies and robotic devices in the agriculture. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2021;15(4):6-10. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10>
2. Anishchenko A.N., Shutikov A.A. Problems of implementation of the Russian Food Security Doctrine. *Food Policy and Security*. 2021;8(1):9-22. (In Russ.) <https://doi.org/10.18334/ppib.8.1.111777>
3. Bulgakov A., Bulgakova D., Motovilov K. et al. Features of feeding complete feed mixtures to a milking herd under tie-up housing. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2024;7:42-49. (In Russ.) <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2024-237-7-42-49>
4. Nikitin E.A. Technological analysis of systems of preparation of feed mixtures for cattle. *Innovatsii v selskom khozyaystve*. 2019;2:53-61. (In Russ.)
5. Stolyarova O.A., Reshetkina, Yu.V. Development of the feed base of dairy cattle breeding. *Sursky Vestnik*. 2022;3:96-99. (In Russ.)
6. Mikhaylichenko S.M., Kuprenko, A.I. Automation of feeding rations' cooking and distributing on cattle farms. *Machinery and Technologies in Livestock*. 2023;1(49):11-19. (In Russ.)
7. Tsench Yu.S. Scientific and technological potential as the main factor for agricultural mechanization development. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2022;16(2):4-13. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-2-4-13>
8. Bulatov S.Yu., Zykin A.A., Nechaev V.N. et al. Model of feed preparation in the conditions of small farms.

8. Булатов С.Ю., Зыкин А.А., Нечаев В.Н. и др. Модель приготовления кормов в условиях малых форм хозяйствования // Техника и оборудование для села. 2023. № 4. С. 26-30. EDN: LIHQCT

9. Морозов Н.М. Направления технического прогресса в механизации и автоматизации животноводства и эффективность их применения // Техника и оборудование для села. 2022. № 12 (306). С. 2-5. EDN: SKUYQQ

10. Никитин Е.А., Кирсанов В.В., Самарин Г.Н. и др. Совершенствование технологии раздачи корма на молочно-товарных фермах для крупного рогатого скота // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2024. Т. 25, № 5. С. 938-948. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.5.938-948>

11. Фролов В.Ю., Рытов К.П. Совершенствование технологического процесса смешивания концентрированных кормов // Эффективное животноводство. 2023. № 3 (185). С. 70. EDN: FZVHCN

12. Косолапов В.М., Шевцов А.В., Милев А.Д. Стратегия разработки смесителей кормов для животноводческих ферм // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. 2015. № 3 (19). С. 129-134. EDN: VCGSED

13. Samarin G.N., Vasilyev A.N., Dorokhov A.S. et al. Optimization of power and economic indexes of a farm for the maintenance of cattle. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020;1072:679-689. https://doi.org/10.1007/978-3-030-33585-4_66

Информация об авторах

¹ Самарин Геннадий Николаевич, д-р техн. наук, профессор; samaringn@yandex.ru; <http://orcid.org/0000-0002-4972-8647>; SPIN-код: 3903-0454

² Кирсанов Владимир Вячеславович, чл.- корр. РАН, д-р техн. наук, профессор; kirvv2014@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0003-2549-4070>; SPIN-код: 3983-5253

³ Никитин Евгений Александрович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник; evgeniy.nicks@yandex.ru; <http://orcid.org/0000-0003-0918-2990>; SPIN-код: 7453-6947.

⁴ Баишева Равза Анвяровна, канд. техн. наук, старший научный сотрудник; rozamamedova@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0001-9145-4478>; SPIN-код: 2189-0469

^{1,2,3,4} Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5

Вклад авторов

Кирсанов В.В. – концептуализация, верификация данных, руководство исследованием;

Самарин Г.Н. – методология, программное обеспечение, ресурсы;

Никитин Е.А. – формальный анализ, администрирование данных, создание черновика рукописи;

Баишева Р.А. – создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование, проведение исследования, визуализация.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 31.10.2025, после рецензирования и доработки 16.04.2026, принята к публикации 14.05.2026

Machinery and equipment for rural areas. 2023;4:26-30. (In Russ.) <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2023-4-26-30>

9. Morozov N.M. Directions of technical progress in the mechanization and automation of animal husbandry and the effectiveness of their application. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2022;12(306):2-5. (In Russ.)

10. Nikitin E.A., Kirsanov V.V., Samarin G.N. et. all. Improving the technology of feed distribution on dairy farms for cattle. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2024;25(5):938-948. (In Russ.) <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.5.938-948>

11. Frolov V.Yu., Rytov K.P. Improving the technological process of mixing concentrated feeds. *Effektivnoe zhivotnovodstvo*. 2023;3(185):70. (In Russ.)

12. Kosolapov V.M., Shevtsov A.V., Milev A.D. Strategy for the development of feed mixers for livestock farms. *Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta mekhanizatsii zhivotnovodstva*. 2015;3:129-134. (In Russ.)

13. Samarin G.N., Vasilyev A.N., Dorokhov A.S. et al. Optimization of power and economic indexes of a farm for the maintenance of cattle. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020;1072:679-689. https://doi.org/10.1007/978-3-030-33585-4_66

Author Information

Gennadiy N. Samarin¹, DSc (Eng), Chief Research Engineer, Associate Professor; samaringn@yandex.ru; <http://orcid.org/0000-0002-4972-8647>

Vladimir V. Kirsanov², Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, DSc (Eng), Professor; kirvv2014@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0003-2549-4070>.

Evgeniy A. Nikitin³, Senior Research Engineer, CSc (Eng), evgeniy.nicks@yandex.ru; <http://orcid.org/0000-0003-0918-2990>.

Ravza A. Baisheva⁴, CSc (Eng), Lead Specialist; rozamamedova@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0001-9145-4478>;

^{1,2,3,4} Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 109428, Russian Federation, Moscow, 1st Institutsky Proyezd Str., 5

Author Contribution

V.V. Kirsanov – conceptualization, data verification, researcher supervision;

G.N. Samarin – methodology, software, resources;

E.A. Nikitin – formal analysis, data administration, writing – original draft; resources;

R.A. Baisheva – writing – review and editing of the manuscript, investigation, visualization

Conflict of interests

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

Received 31.10.2025; Revised 16.04.2026; Accepted 14.05.2026

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 632.08:632.935.11

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-3-17-26>

Анализ тепловой эффективности обеззараживающего электродного нагрева почвы

А.А. Завалий¹, Н.В. Алдошин², С.С. Воложанинов³, Д.Д. Волобуев⁴^{1,3,4} Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского; г. Симферополь, Россия² Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия¹ zavalym@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0806-1110>² naldoshin@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8000-4532>³ s.volozhaninov@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6686-1220>⁴ volobyev99@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0004-5643-9087>

Аннотация. Обеззараживающая обработка почвы в теплицах позволяет очистить ее от патогенной микрофлоры и летучих органических веществ и улучшить качество производимой растительной продукции. Электродный нагрев почвы и эффективность различных его схем пока не изучены. Цель исследований – определение показателей тепловой эффективности электродного обеззараживающего нагрева слоя почвы. С помощью вычислительных моделей COMSOL Multiphysics выполнено моделирование электродного нагрева образцов почвы в среднем от 20,7 до 87,1°C влажностью 5 и 20% с использованием электродов различной формы (стержневых цилиндрических, плоских пластинчатых и дисковых). Электрический потенциал электродов составлял +150...-150 В. Время нагрева – 60 с. Размеры расчетной области: длина – 800 мм, ширина – 400 мм, глубина – 300 мм; размеры нагреваемого образца почвы – 200 x 200x60 мм. Глубина погружения электродов в почву составляла 100 мм. Проведено расчетное моделирование нагрева образца почвы пластинчатыми электродами при наличии электроизоляции, изменении количества электродов (2, 3, 8, 14) и их взаимного расположения. Установили зависимость необходимой для нагрева разности потенциалов на электродах от свойств почвы, геометрии электродов и их размещения в обрабатываемом слое почвы. Выявили, что дисковые электроды обеспечивают наилучшую равномерность температурного поля в нагреваемом образце за счет цилиндрического расположения линий электрического потенциала между электродами. Повышение эффективности устройств прямого обеззараживающего нагрева слоя почвы достигается уменьшением расстояния между электродами, увеличением их количества, использованием электроизолирующих материалов. Равномерный нагрев объема почвы и высокая энергетическая эффективность нагрева 96,32% достигаются при полной изоляции поверхности электродов и образца почвы. Разработанные расчетные модели позволяют проектировать энергоэффективные устройства, обеспечивающие прямой электрический равномерный нагрев обрабатываемого слоя почвы.

Ключевые слова: почва; обеззараживающая обработка почвы; электродный нагрев почвы; электрод; электрический потенциал; эффективность нагрева; устройства прямого электрического нагрева

Для цитирования: Завалий А.А., Алдошин Н.В., Воложанинов С.С., Волобуев Д.Д. Анализ тепловой эффективности обеззараживающего электродного нагрева почвы // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 3. С. 17-26. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-3-17-26>

ORIGINAL ARTICLE

Analysis of thermal efficiency of disinfection electrode heating of the soil

A.A. Zavaliy¹, N.V. Aldoshin², S.S. Volozhaninov³, D.D. Volobuev⁴^{1,3,4} V.I. Vernadsky Crimean Federal University; Simferopol, Russia² Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Moscow, Russia¹ zavalym@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0806-1110>² naldoshin@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8000-4532>³ s.volozhaninov@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6686-1220>⁴ volobyev99@mail.ru

Abstract. Disinfection treatment of greenhouse soil helps eliminate pathogenic microflora and volatile organic compounds, thereby improving the quality of plant products. However, electrode-based soil heating and

the effectiveness of its various configurations have not yet been sufficiently investigated. The study aims to determine the thermal efficiency indicators of electrode-based disinfection heating of a soil layer. Using computational models in COMSOL Multiphysics, the authors simulated electrode heating of soil samples with moisture contents of 5% and 20%, raising the average temperature from 20.7°C to 87.1°C. Electrodes of various geometries were employed: cylindrical rod electrodes, flat plate electrodes, and disc electrodes. The electric potential applied to the electrodes was ± 150 V, with a heating duration of 60 seconds. The computational domain measured 800 mm in length, 400 mm in width, and 300 mm in depth; the heated soil sample itself had dimensions of $200 \times 200 \times 60$ mm. Electrodes were immersed to a depth of 100 mm. Computational modeling was also performed for heating a soil sample with plate electrodes under electrical insulation conditions, varying the number of electrodes (2, 3, 8, 14) and their mutual arrangement. The study established relationships between the required potential difference for heating and the soil properties, electrode geometry, and electrode placement within the treated layer. The results indicate that disc electrodes provide the best temperature field uniformity in the heated sample due to the cylindrical configuration of electric potential lines between the electrodes. Improving the efficiency of direct disinfection heating devices can be achieved by reducing the distance between electrodes, increasing their number, and employing electrically insulating materials. Uniform heating of the soil volume and a high energy efficiency of 96.32% are attained when both the electrodes and the soil sample surfaces are fully insulated. The developed computational models enable the design of energy-efficient units that ensure direct, uniform electrical heating of the treated soil layer.

Keywords: soil; soil disinfection treatment; electrode heating of the soil; electrode; electric potential; heating efficiency; direct electric heating devices

For citation: Zavaliy A.A., Aldoshin N.V., Volozhaninov S.S., Volobuev D.D. Analysis of thermal efficiency of disinfection electrode heating of the soil. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(3):17-26. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-3-17-26>

Введение

Патогенная бактериальная и грибковая микрофлора почвы негативно влияет на качество сельскохозяйственной продукции [1-3]. Обеззараживающая обработка почвы осуществляется химическими и физическими методами [1]. При химической обработке, помимо загрязнения почвы и грунтовых вод пестицидами, происходит опосредованное загрязнение, обусловленное хранением, переработкой и утилизацией неиспользованных пестицидов на агропромышленных предприятиях^{1,2} [4]. Избежать отрицательного действия на окружающую среду позволяют физические методы. Одним из них является нагрев почвенного слоя различными теплоносителями (вода, водяной пар, продукты сгорания углеводородного топлива)³ [1, 5], который сопровождается существен-

ными тепловыми потерями в окружающую среду [6]. Другой перспективный метод – прямой нагрев электрическим током (электродный нагрев почвы) или электромагнитным излучением с характерной высокой тепловой отдачей без потерь в окружающую среду, высокой скоростью и равномерностью нагрева слоя почвы [6-8]. К тому же электродный нагрев почвы приводит к ее обеззараживанию от патогенной микрофлоры [9, 10] и очистке от летучих органических веществ. Снижение химического воздействия позволяет сократить содержание пестицидов в почве и грунтовых водах, тем самым улучшить качество производимой растительной продукции [11, 12].

В практике применения электродного обеззараживающего нагрева слоя почвы сталкиваются с необходимостью снижения переходного сопротивления от проводника электрического тока к слою почвы и утечек электрического потенциала в окружающий обрабатываемый слой. Существует зависимость тепловыделения в почве от ее влажности и состава [7]. В устройствах электродного нагрева применяют электроды различной формы: цилиндрические стержни; плоские пластины или скользящие в прорезаемой борозде полозья; дисковые электроды, катящиеся по прорезаемой борозде^{4,8}. К трехфазной сети элект-

¹ Состояние загрязнения пестицидами объектов природной среды Российской Федерации в 2022 году: Ежегодник. Обнинск: ФГБУ «НПО «Тайфун», 2023. 88 с.

² Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2022 год / Под ред. Г.М. Черногаевой. М.: Росгидромет, 2023. 215 с.

³ Пospelova И.Г., Возмищев И.В. Способы обеззараживания почвы и субстрата в условиях защищенного грунта // Аграрная наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения: Материалы XII Международной научно-практической конференции, посвященной 160-летию со дня рождения П.А. Столыпина (г. Ульяновск, 14-15 апреля 2022 г.). Ульяновск: Ульяновский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина, 2022. С. 453-457. EDN: ROIQEE.

⁴ Передвижное устройство для стерилизации почвы и стимулирования роста полезных растений: А.с. 75810 СССР, МПК А 01М 17/00. (СССР). № 359088 / Б.Б. Кажинский; заявл. 08.09.49; опубл. 30.06.49. 2 с. EDN: YTXVVN.

роды подключают по схемам «Звезда» или «Треугольник»; используют также «нулевые» электроды с целью уменьшения потерь от токов утечек при обработке почвы [7]. Экспериментальная оценка потерь энергии при обеззараживающей обработке почвы и сведения о температурной неравномерности (необходимости охлаждать электроды во время обработки) представлены в исследовании [7]. Однако в источниках литературы не удалось обнаружить сведения о количественном анализе энергетической эффективности применения различных схем электродного нагрева и об оценке равномерности нагрева при использовании этих схем.

Цель исследований: определение показателей тепловой эффективности электродного обеззараживающего нагрева слоя почвы.

В качестве показателей рассмотрим отношение количества тепловой энергии, накопленной в слое почвы при ее нагреве, к количеству энергии, затраченной на процесс нагрева, и степень равномерности нагрева обрабатываемого слоя почвы.

Материалы и методы

Инструментом расчетного исследования является интегрированная программная среда COMSOL

Multiphysics, основанная на методе конечных элементов⁵. Для решения задачи электротеплового взаимодействия электродов и массива почвы использованы модули решателей AC/DC → Electric Fields and Currents → Electric Currents и Heat Transfer → Heat Transfer in Solids, переменными величинами в которых являются (Electric potential (V)) и температура (Temperature (T)). Задача решается в нестационарной, зависящей от времени постановке (General Studies → Time dependent). Общая схема электротеплового взаимодействия электродов и массива почвы представлена на рисунке 1.

Расчетная область, включающая в себя боковые 3 и центральный 4 массивы почвы (рис. 1), имеет следующие размеры: длину 800 мм, ширину 400 мм, глубину 300 мм. Нагреваемый образец почвы 2 составляет 200×100×60 мм соответственно. Глубина погружения электродов в почву – 100 мм. Области центрального 4 и боковых массивов почвы 3 разделены с целью возможности задания для них различной влажности (5 и 20%) и, соответственно, тепловых и электрических свойств. Постоянные свойства почвы, принятые к моделированию теплового и электрического взаимодействия электродов с почвой^{6,7,8} приведены в таблице 1.

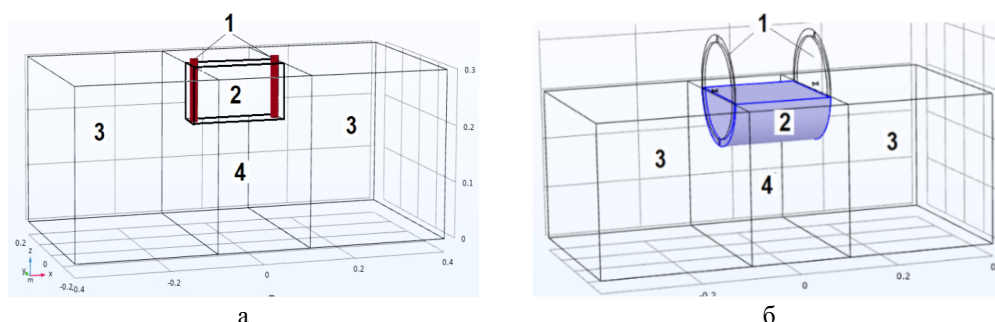


Рис. 1. Схема электротеплового воздействия на массив почвы электродов в виде стержней и пластин (а) и дисков (б): 1 – электроды; 2 – нагреваемый образец почвы; 3 – боковой массив почвы; 4 – центральный массив почвы

Fig. 1. Pattern of electrothermal interaction of electrodes and soil mass:

a – rod and plate electrodes; b – disc electrodes; 1 – electrodes; 2 – heated soil sample; 3 – lateral soil array; 4 – central soil array

Свойства почвы, принятые к моделированию

Таблица 1

Table 1

Soil properties taken for modeling

Влажность почвы, %	Плотность, кг/м ³	Теплоемкость, Дж/(кг·К)	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Относительная диэлектрическая проницаемость	Электрическая проводимость, См/м
5	1100	1150	0,8	3	0,005
20	1300	1350	0,9	30	0,5

⁵ Курушин А.А. Решение мультифизических СВЧ задач с помощью САПР COMSOL. М.: One-Book, 2016. 376 с.

⁶ Электрическая проводимость почвы. URL: https://studfile.net/html/1334/288/html_SzT016FBAL.l0og/img-ummcB6.png (дата обращения: 09.10.2025);

⁷ Относительная диэлектрическая проницаемость. URL: <https://konspekta.net/studopedia.net/baza7/572746186364.files/image085.png> (дата обращения: 09.10.2025).

⁸ Магнитная проницаемость. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Магнитная_проницаемость (дата обращения: 09.10.2025).

Боковые и нижняя границы расчетной области имеют нулевой электрический потенциал, верхняя граница электроизолирована. На рисунке 2 представлены линии тока электрического потенциала в расчетной области при приложении к электродам положительного и отрицательного потенциалов, демонстрирующие направление утечек энергии электрического поля.

Нагреваемый образец почвы представляет собой цилиндрический сегмент (рис. 1) высотой 200 мм, длиной хорды 219 мм, радиусом 110 мм.

Схемы взаимодействия стержневых цилиндрических, плоских пластинчатых и дисковых электродов, погруженных в массивы почвы различной влажности на глубину 100 мм, представлены в таблице 2. Условия решения задачи электротеплового взаимодействия электродов и почвы для всех схем: потенциалы электродов составляют +150 В и –150 В; время нагрева – 60 с.

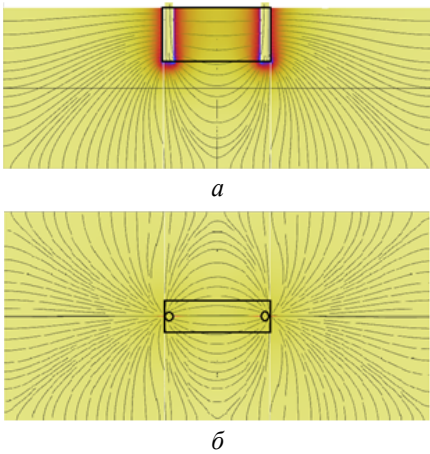


Рис. 2. Линии тока электрического потенциала в расчетной области:
а – вид спереди; б – вид сверху
Fig. 2. Electric potential current lines in the computational domain:
a – front view; b – top view

Схема эксперимента воздействия различных электродов на массивы почвы различной влажности

Таблица 2

Table 2

Experimental design to determine the effect of various electrodes on soil samples of varying moisture content

Вариант	Влажность почвы, %	Массив почвы (рис. 1)	Вид электродов		
1	5	2,3,4	1. Стержневые электроды диаметром 16 мм (площадь сечения – 201 мм²)	2. Пластина́тые электроды сечением 5×40 мм (площадь сечения – 200 мм²)	3. Дисковые электроды диаметром 220 мм толщиной 5 мм. Диаметр подводящего токопровода – 8 мм (площадь сечения – 50,3 мм²)
2	20	2,3,4			
3	20	2 и 4			
	5	3			
4	20	2			
	5	3,4			

Результаты и их обсуждение

Результаты расчета эффективности нагрева, определяемой как отношение мощности нагрева образца почвы к затрачиваемой электрической мощности, приведены в таблице 3.

На рисунке 3 приведены изотермы (вид спереди и вид сверху) образца почвы в диапазоне от 35 до 140°С.

Из данных рисунка 3 следует, что наибольшая равномерность нагрева образца почвы для всех рассматриваемых схем наблюдается в варианте 4. Изменение температуры в сечениях, проходящих через оси электродов, по линиям на глубине 0,01; 0,03; 0,05 и 0,09 м для варианта 4 приведено на рисунке 4.

Использование при выполнении расчетного моделирования постоянных по величине свойств почвы и плотного электрического контакта почвы и электродов позволило получить наилучшие оценки

энергетической эффективности и равномерности нагрева образца почвы.

Проведено расчетное моделирование нагрева образца почвы пластина́тыми электродами при наличии электроизоляции боковых поверхностей электродов и образца почвы (рис. 5а), электроизоляции боковых поверхностей и донной поверхности образца почвы (рис. 5б) и электроизоляции боковых, лицевых и донных поверхностей образца почвы (рис. 5в). Физические свойства электроизолирующего слоя соответствуют свойствам воздуха.

На рисунке 6 приведены изотермы (вид спереди и вид сверху) образца почвы в диапазоне 35...140°С, а в таблице 4 представлены результаты расчета энергетической эффективности нагрева с использованием электроизоляции. На рисунке 7 для варианта б приведен график изменения температуры в сечениях, проходящих через оси электродов, по линиям на глубине 0,21; 0,23; 0,25 и 0,29 м.

Таблица 3

Эффективность нагрева образца почвы

Table 3

Efficiency of heating the soil sample

Вариант, №	Сила тока в электроде, А	Электрическая мощность, Вт	Мощность нагрева образца, Вт	Мощность нагрева массива, Вт	Эффективность нагрева, %	Средняя температура образца, °С
Схема 1. Electroды-стержни						
1	0,207	62,1	22,72	59,86	36,60	20,9
2	20,7	6207	2354	5737	37,93	87,1
3	14,02	4205	2050	3435	48,74	78,4
4	5,24	1570	1366	1543	86,97	58,9
Схема 2. Electroды-пластины						
1	0,246	73,6	16,82	68,79	22,80	20,7
2	24,55	7365	1724	6962	23,41	69,2
3	14,10	4233	1846	3505	43,61	72,6
4	4,94	1483	1285	1469	86,71	56,6
Схема 3. Electroды-диски						
1	0,49	148,2	38,7	126,96	26,11	25,66
2	49,3	14799	4310	14141	29,18	66,00
3	28,7	8613	4230	7740	49,06	65,08
4	13,8	4132	3670	3980	88,90	59,19

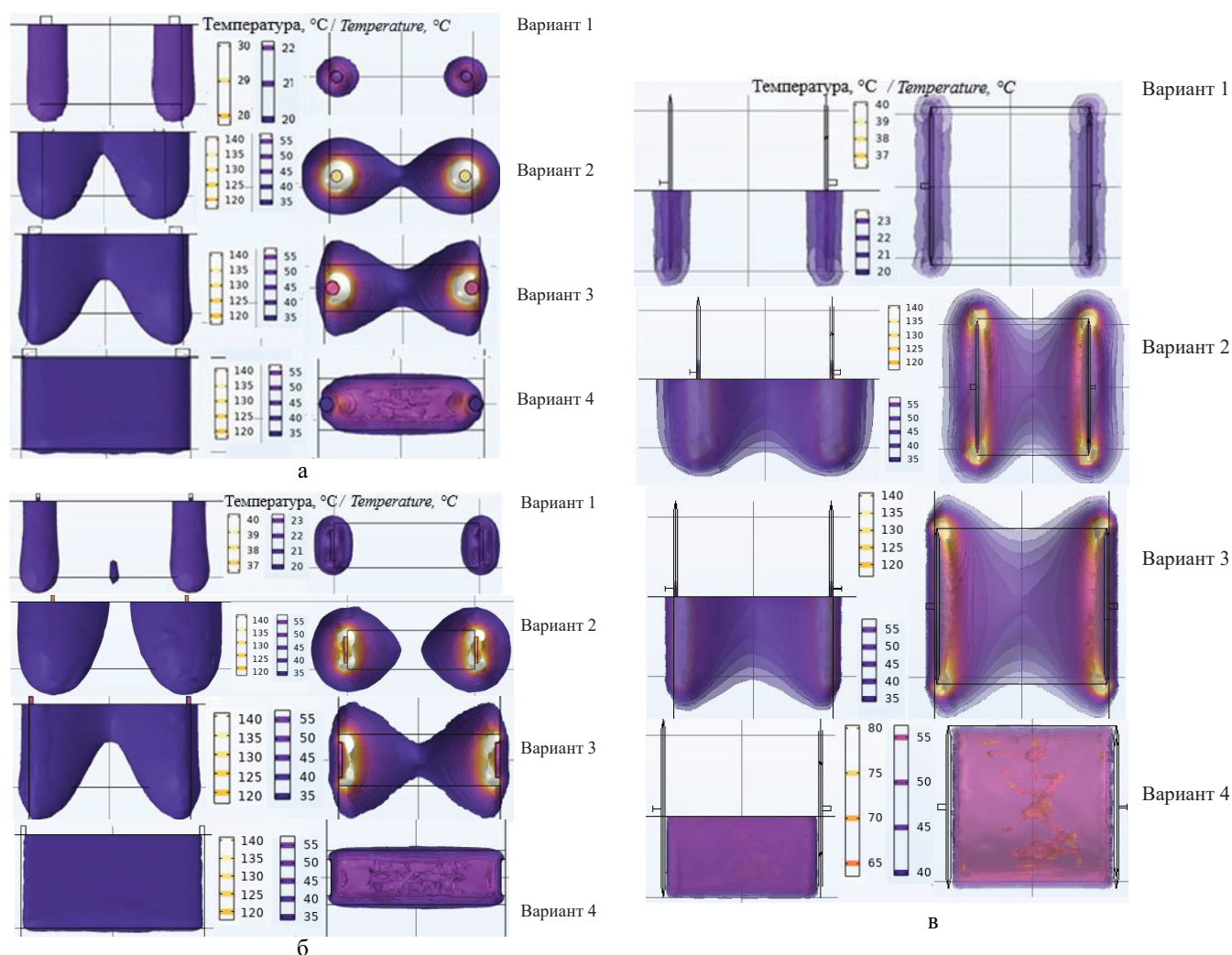


Рис. 3. Распределение температуры в образце почвы:
а – электроды-стержни; б – электроды-пластины; в-электроды-диски

Fig. 3. Temperature distribution in the soil sample:
a – Rod electrodes; b – Plate electrodes; c – Disc electrodes

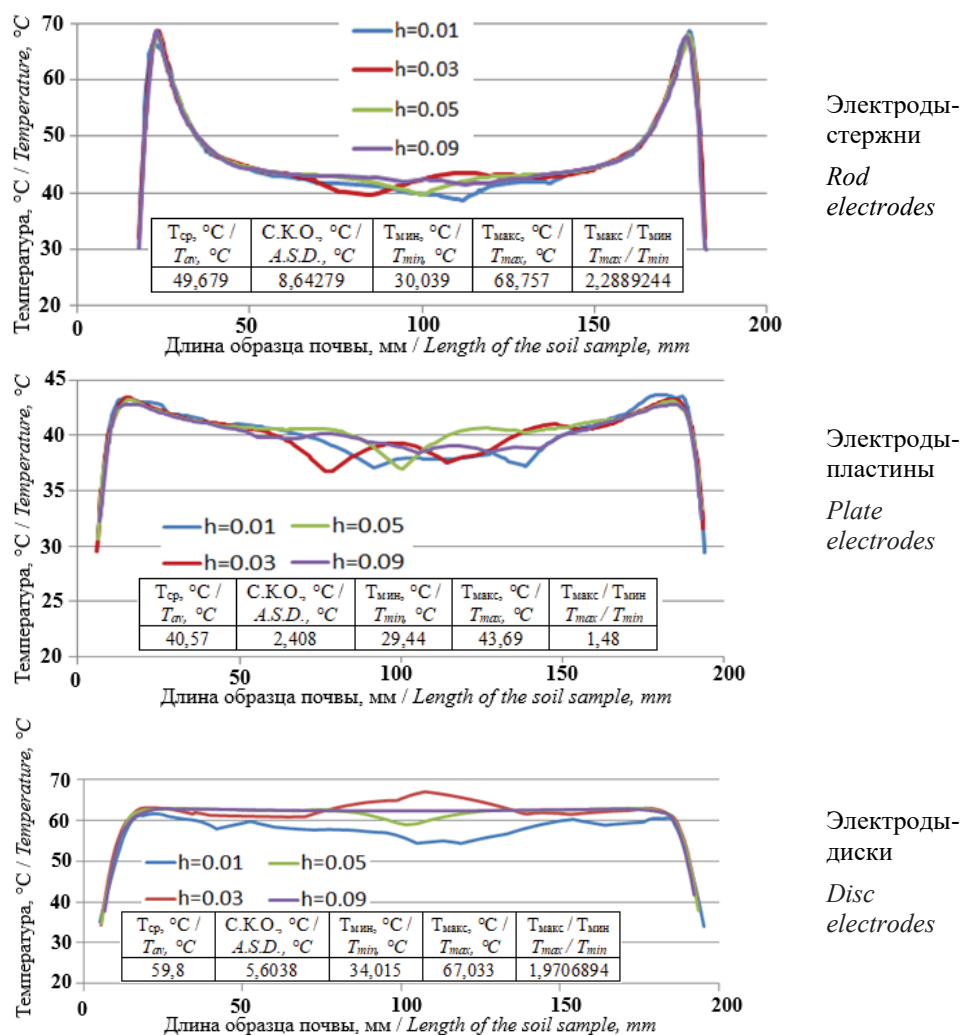


Рис. 4. Распределение температуры в осевом сечении образца почвы

Fig. 4. Temperature distribution in the axial section of the soil sample

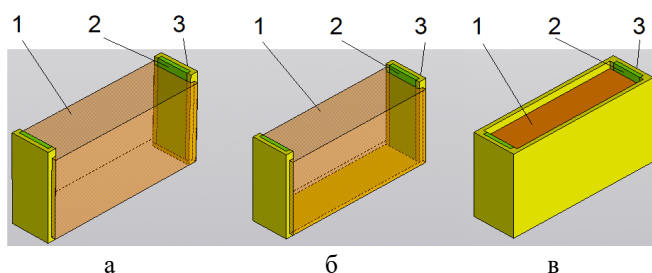


Рис. 5. Схемы нагрева с использованием электроизоляции боковых поверхностей электродов и образца почвы (а), боковых поверхностей и донной поверхности образца почвы (б), боковых, лицевых и донных поверхностей образца почвы (в):
1 – нагреваемый образец почвы; 2 – электроды;
3 – электроизоляция

Fig. 5. Heating patterns of the soil sample using electrical insulation:

a – electrical insulation of the side surfaces of the electrodes and the soil sample; b – electrical insulation of the side surfaces and the bottom surface of the soil sample;
c – electrical insulation of the side, front and bottom surfaces of the soil sample;
1 – heated soil sample; 2 – electrodes; 3 – electrical insulation

Электроизоляция гарантирует отсутствие токов утечек через свою поверхность и повышение энергетической эффективности нагрева образца почвы.

Согласно данным рисунка 6 и таблицы 4 боковая изоляция позволяет повысить эффективность по сравнению со случаем влажного образца и центрального массива и сухих боковых массивов почвы с 43,61 до 51% (схема 2. Электроды-пластины, вариант 3 таблицы 3), но при этом создает поле температуры внутри образца, где центральная часть образца не подвергается нагреву (рис. ба). Изоляция боковых и донной поверхности позволяет поднять величину эффективности до 88,6%, но тоже не обеспечивает нагрев центральной части образца почвы. Только полная изоляция всех поверхностей позволяет повысить энергетическую эффективность нагрева до 96,32% и равномерность нагрева по всему объему образца почвы, что является ожидаемым результатом для рассматриваемой задачи.

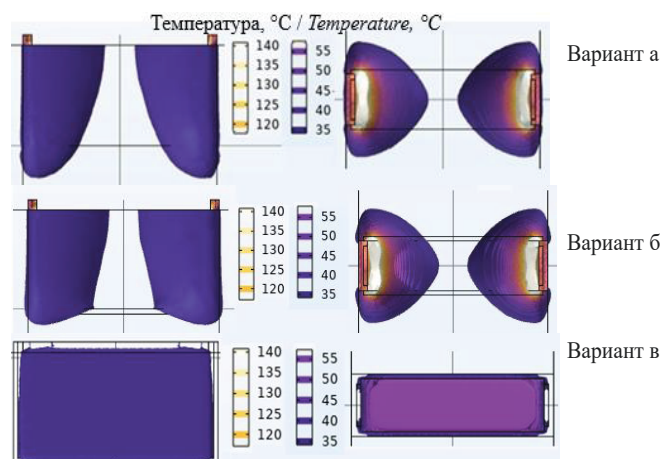


Рис. 6. Распределение температуры в образце почвы
Fig. 6. Temperature distribution in the soil sample

Техническими решениями, направленными на повышение энергетической эффективности и равномерности нагрева почвы, являются уменьшение расстояния между электродами (сокращение пространства рассеяния электрического потенциала в направлениях вперед/назад и вниз по отношению к расположению электродов) и увеличение количества электродов (уменьшение доли потерь электрического потенциала в боковые массивы почвы). Однако такие технические решения существенно усложняют конструкцию устройств

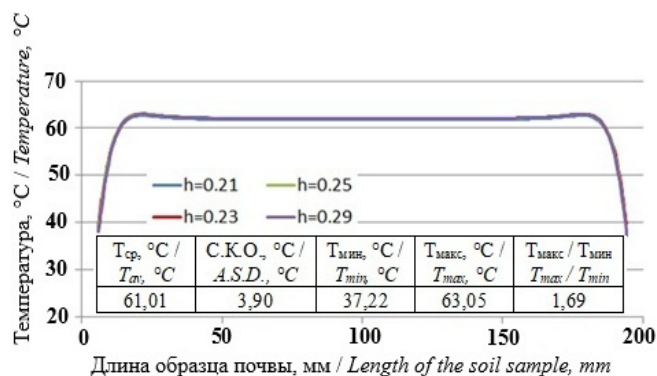


Рис. 7. Распределение температуры в осевом сечении образца почвы в случае изоляции боковых и донной поверхностей образца почвы
Fig. 7. Temperature distribution in the axial section of the soil sample with the insulated side and bottom surfaces of the soil sample

нагрева и управление энергоснабжением электродов устройства.

В таблице 5 приведены результаты расчета энергетической эффективности нагрева слоя почвы влажностью 20% пластинчатыми электродами: 1-й вариант – 2 электрода на расстоянии 100 мм; 2-й вариант – 3 электрода, расположенные в ряд на расстоянии 100 мм друг от друга; 3-й вариант – 8 расположенных в ряд электродов на расстоянии 100 мм друг от друга; 4-й вариант – 14 расположенных в ряд электродов

Эффективность нагрева образца почвы с использованием электроизоляции

Таблица 4

Efficiency of heating the soil sample when using electrical insulation

Table 4

Вариант, №	Сила тока в электроде, А	Электрическая мощность, Вт	Мощность нагрева образца, Вт	Мощность нагрева массива, Вт	Эффективность нагрева, %	Средняя температура образца, °C
a	12,8	3839	1958	3109	51,00	75,78
б	4,83	1450	1285	1449	88,60	56,61
в	3,92	1177	1134	1138	96,32	60,79

Эффективность нагрева образца почвы

Таблица 5

Efficiency of heating the soil sample

Table 5

Вариант, №	Разность потенциалов, В	Сила тока в электроде, А	Электрическая мощность, Вт	Мощность нагрева образца, Вт	Мощность нагрева массива, Вт	Эффектив-ность нагрева, %	Средняя температура образца, °C
1	180	17,2	3094	950	2895	30,71	74,14
2	180	16,7	6019	1954	4524	32,50	75,67
3	160	17,45	11168	5971	10376	53,51	70,53
4	160	17,74	19866	11067	18439	55,75	70,31

на расстоянии 100 мм друг от друга. Между соседними электродами установлена разность потенциалов, обеспечивающая среднюю температуру нагрева образца почвы в пределах 70...75°C в течение 60 с.

На рисунке 8 представлены линии тока электрического потенциала в расчетной области для

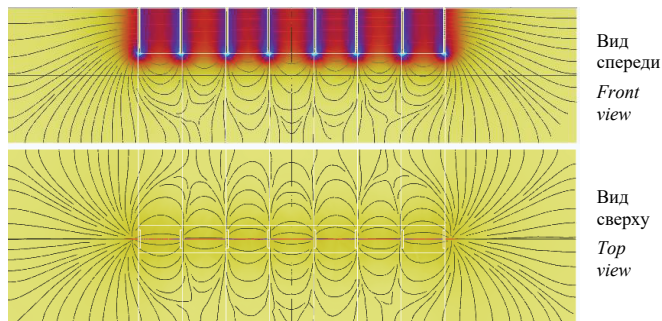


Рис. 8. Линии тока электрического потенциала в расчетной области

Fig. 8. Electric potential current lines in the computational domain

варианта 3 (8 электродов). На рисунке 9 представлены графики распределения температуры в сечении расчетной области, проходящем через оси электродов, по линиям на глубине 0,01; 0,03; 0,05 и 0,09 м после нагрева в течение 60 с, а также распределение электрического потенциала в массиве почвы между электродами в этом же сечении для варианта 3.

Сравнивая данные (схема 2. Электроды-пластины, вариант 2 таблицы 3) с данными таблицы 5, можно заключить, что уменьшение расстояния между электродами с 200 до 100 мм привело к повышению эффективности нагрева с 23,41 до 30,71%. Увеличение количества электродов до 8 позволило повысить эффективность до 53,51%; эффективность использования 14 электродов составила 55,75%. При этом в объеме нагреваемого слоя почвы наблюдается существенная неравномерность температуры (рис. 9), которая сохраняется и для варианта 4 (14 электродов).

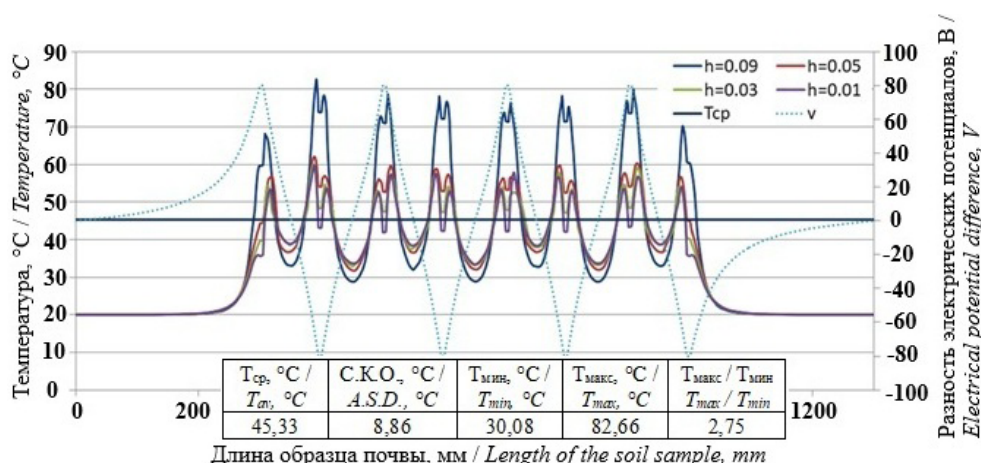


Рис. 9. Распределение температуры и разности электрических потенциалов в осевом сечении расчетной области почвы

Fig. 9. Distribution of temperature and electric potential difference in the axial section of the computational domain of the soil

Выводы

1. Утечки электрического потенциала через равномерно влажную почву, окружающую электроды и нагреваемый образец почвы, не позволяют в рассмотренных схемах нагрева получить эффективность нагрева более 40%.

2. Форма электродов несущественно влияет на энергетическую эффективность. Дисковые электроды обеспечивают наилучшую равномерность температурного поля в нагреваемом образце за счет цилиндрического расположения линий электрического потенциала между электродами.

3. Повышение энергетической эффективности нагрева достигается при увеличении электрического

сопротивления почвы, окружающей электроды, и нагреваемого образца почвы (нагреваемый образец почвы влажностью 20% окружен почвой влажностью 5%).

4. Энергетическая эффективность и равномерность нагрева почвы зависят от ее свойств и геометрии размещения электродов в ней. Необходимая для заданного уровня нагрева разность потенциалов на электродах существенно зависит от свойств почвы, геометрии электродов и их размещения в обрабатываемом слое почвы.

5. Повысить эффективность устройств прямого обеззараживающего нагрева слоя почвы можно уменьшением расстояния между электродами

устройства, увеличением количества электродов и использованием в устройствах электроизолирующих материалов.

6. Разработанные расчетные модели в программной среде COMSOL Multiphysics позволяют

проектировать энергоэффективные устройства прямого электрического нагрева почвы, обеспечивающие равномерный нагрев обрабатываемого слоя.

Список источников

1. Микаелян Г.А., Нурметов Р.Д. Способы и методы обеззараживания почвы в теплицах // В кн.: Основы оптимального проектирования производственных процессов в овощеводстве: Монография. М.: Росинформагротех, 2005. С. 443-448. EDN: QKXKUZ
2. Никитина О.В., Стифеев А.И., Трутаева Н.Н. Микроорганизмы почв и их влияние на урожайность сельскохозяйственных культур // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2024. № 4. С. 63-69. EDN: TCQXMP
3. Домрачева Л.И., Скугорева С.Г., Ковина А.Л. и др. Специфика растительно-микробных комплексов при антропогенном загрязнении почвы (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 3. С. 14-25. EDN: GWOPRX
4. Смирнова П.С., Тихомирова В.В. Проблема загрязнения почвы пестицидами и пути ее решения // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2023. № 3. С. 37-41. <https://doi.org/10.17513/mjpf.13519>
5. Пospelova И.Г., Возмищев И.В., Ниязов А.М. К вопросу о способах обеззараживания почвы в защищенном грунте // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2020. Т. 67, № 3 (40). С. 45-49. EDN: NONPMR
6. Кабалоев Т.Х., Гатуева К.К., Гокоев Т.М., Никколова Л.С. Температурное поле тепличной почвы при термоэлектрическом способе нагрева // Известия Горского государственного аграрного университета. 2018. Т. 55, № 4. С. 148-152. EDN: YRLMVN
7. Баранов Л.А., Бурнаев М.Г. Устройство для электротермической обработки почвы защищенного грунта // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». 2007. № 20. С. 46-49. EDN: KWUPRZ
8. Воложанинов С.С., Алдошин Н.В., Завалий А.А. и др. Применение физических методов обработки для обеззараживания почвы // Агроинженерия. 2022. Т. 24, № 6. С. 32-37. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-6-32-37>
9. Топорков В.Н., Королев В.А. Интенсификация электроимпульсных процессов в агротехнологиях // Вестник аграрной науки Дона. 2017. № 3 (39). С. 1-10. EDN: ZVHYKR
10. Jason D. Crisp, Ekaterini Riga, Gordon J. McComb. Method and apparatus for the management of a soil pest or pathogen: patent US12433285B2. Lisi Global Inc. US. 2025.10.07. Appl. No. US18/243,060 filed 2023.09.06. IPC: A01M19/00. URL: US12433285B2 – Method and apparatus for the management of a soil pest or pathogen – Google Patents (date of access: 23.11.2025)
11. Wolf J., Gomes T., Barton T., Damasi D. Electrical resistance heating: rapid treatment for soil and groundwater remediation. Águas Subterrâneas. July 2009. URL: (PDF) Electrical Resistance Heating: Rapid Treatment for Soil and Groundwater Remediation (date of access: 23.11.2025)
12. Никишина О.В., Морозов Г.А. Комбинированные методы обработки почв // Электроника, фотоника и киберфизические системы. 2022. Т. 2, № 2. С. 51-55. EDN: LNRICH

References

1. Mikaelyan G.A., Nurmetov R.D. Methods and methods of soil disinfection in greenhouses. In: Fundamentals of optimal design of production processes in vegetable growing: Monograph. Moscow, Rosinformagrotekh. 2005:443-448. (In Russ.)
2. Nikitina O.V., Stifeev A.I., Trutaeva N.N. Soil microorganisms and their effect on crop yields. *Vestnik Kurskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii*. 2024;4:63-69. (In Russ.)
3. Domracheva L.I., Skugoreva S.G., Kovina A.L. et al. Specificity of plant-microbial complexes under anthropogenic soil pollution (review). *Theoretical and Applied Ecology*. 2022;3:14-25. (In Russ.)
4. Smirnova P.S., Tikhomirova V.V. The problem of soil contamination with pesticides and ways to solve it. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2023;3:37-41. (In Russ.) <https://doi.org/10.17513/mjpf.13519>
5. Pospelova I.G., Vozdizhchev I.V., Niyazov A.M. Soil disinfection methods in protected ground. *Electrical Engineering and Electrical Equipment in Agriculture*. 2020;67(3):45-49. (In Russ.)
6. Kabaloev T.Kh., Gatuева K.K., Gokoyev T.M., Nikkolova L.S. Temperature field of greenhouse ground when thermoelectric method of heating. *Proceedings of Gorsky State Agrarian University*. 2018;55(4):148-152. (In Russ.)
7. Baranov L.A., Burnaev M.G. Device for electrothermal tillage of protected soil. *Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering*. 2007;20:46-49. (In Russ.)
8. Volozhaninov S.S., Aldoshin N.V., Zavaliy A.A. et al. Application of physical treatment methods for soil disinfection. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2022;24(6):32-37. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-6-32-37>
9. Toporkov V.N., Korolev V.A. Intensification of electric pulse processes in agrotechnologies. *Don Agrarian Science Bulletin*. 2017;3:1-10. (In Russ.)
10. Jason D. Crisp, Ekaterini Riga, Gordon J. McComb. Method and apparatus for the management of a soil pest or pathogen: patent US12433285B2. Lisi Global Inc. US. 2025.10.07. Appl. No. US18/243,060 filed 2023.09.06. IPC: A01M19/00. URL: US12433285B2 – Method and apparatus for the management of a soil pest or pathogen – Google Patents (Access date: 23.11.2025).
11. Wolf J., Gomes T., Barton T., Damasi D. Electrical resistance heating: rapid treatment for soil and groundwater remediation. *Águas Subterrâneas*. July 2009. URL: (PDF) Electrical Resistance Heating: Rapid Treatment for Soil and Groundwater Remediation (Access date: 23.11.2025).
12. Nikishina O.V., Morozov G.A. Combined soil treatment methods. *Electronics, Photonics and Cyberphysical Systems*. 2022;2(2):51-55. (In Russ.)

Сведения об авторах

- ¹ **Завалий Алексей Алексеевич**, д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой общетехнических дисциплин; zavalyam@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0806-1110>; SPIN-код: 3604-5109
- ² **Алдошин Николай Васильевич**, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории почвообрабатывающих и мелиоративных машин; naldoshin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0446-1096>; SPIN-код: 6032-9021
- ³ **Воложанинов Сергей Сергеевич**, канд. техн. наук, доцент, декан факультета механизации и пищевых технологий; s.volozhaninov@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6686-1220>; SPIN-код: 1333-7600
- ⁴ **Волобуев Дмитрий Дмитриевич**, аспирант кафедры общетехнических дисциплин; volobyev99@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-5643-9087>; SPIN-код: 9473-4130
- ^{1,3,4} Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского; 295007, Российская Федерация, Республика Крым, г. Симферополь, пр. Академика Вернадского, 4
- ² Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5

Вклад авторов

А.А. Завалий – методология, научное руководство, описание результатов и формирование выводов исследований, создание черновика рукописи;
Н.В. Алдошин – актуальность проблемы, концептуализация;
С.С. Воложанинов – проведение исследований, создание окончательной версии рукописи и ее редактирование;
Д.Д. Волобуев – обзор источников литературы, визуализация, проведение исследований.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 14.11.2025, после рецензирования и доработки 28.04.2026, принята к публикации 14.05.2026

Author Information

- Aleksei A. Zavaly**¹, DSc (Eng), Associate Professor, Head of the Department of “General Technical Subjects”; zavalyam@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0806-1110>; Scopus Autor ID: 57214120527
- Nikolay V. Aldoshin**², DSc (Eng), Professor, Chief Research Engineer of the Laboratory of Tillage and Reclamation Machines; naldoshin@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0446-1096>; Scopus Autor ID: 5719413129; Researcher ID: AAD-6548-2022
- Sergey S. Volozhaninov**³, CSc (Eng), Associate Professor, Dean of the Faculty of Mechanization and Food Technologies; s.volozhaninov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6686-1220>; Scopus Autor ID: 57218094232
- Dmitry D. Volobuev**⁴, postgraduate student of Head of the Department of “General Technical Subjects”; volobyev99@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-5643-9087>
- ^{1,3,4} V.I. Vernadsky Crimean Federal University; 4 Akademika Vernadskogo Ave., Simferopol, 295007, Republic of Crimea, Russian Federation
- ² Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 109428, Russian Federation, Moscow, 1st Institutsky Proezd Str., 5

Author Contribution

A.A. Zavaliy – methodology, research supervision, writing – original draft, results and conclusions;
N.V. Aldoshin – conceptualization;
S.S. Volozhaninov – investigation, writing – manuscript review and editing;
D.D. Volobuev – literature review, visualization, investigation.

Conflict of interests

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

Received 14.11.2025; Revised 28.04.2026; Accepted 14.05.2026

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.1.016:697.34

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-3-27-35>

Прогнозирование температуры теплоносителя в отопительной установке аэродинамического нагрева

А.И. Купреенко^{1✉}, Х.М. Исаев², Д.А. Безик³, Д.А. Харченко⁴, С.Х. Исаев⁵^{1, 2, 3, 4, 5} Брянский государственный аграрный университет; Брянская область, Россия¹ kupreenkoai@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3781-9592>² haf-is@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4912-9908>³ bda20101@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1883-716X>⁴ harchenkodmitri@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0009-0566-6278>⁵ Samir.isaev.94@inbox.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6877-3128>

Аннотация. Отопление животноводческих помещений способствует нормализации микроклимата. Применяемые в животноводческих помещениях электрокалориферные установки требуют периодической чистки трубчатых электронагревателей – они не вырабатывают нормативный срок службы и пожароопасны. Водяные и паровые калориферы отличаются высокой стоимостью монтажа и обслуживания. Альтернативой упомянутым калориферам может служить простая по конструкции, надежная и удобная в монтаже отопительная установка аэродинамического нагрева. В основе ее работы заложен роторный нагрев теплоносителя (воздуха) в теплоизолированной рабочей камере с двумя присоединительными патрубками, замкнутыми воздухопроводом-теплообменником. Для исследования возможности использования установки аэродинамического нагрева в отопительных системах животноводческих помещений изготовлены ее опытный образец и макет помещения. Целью исследований являлась разработка математической модели прогнозирования температуры теплоносителя и температуры воздуха в отапливаемом помещении в зависимости от параметров установки, окружающей среды и характеристик ограждений помещения. В осенне-зимний период 2025 г. в Брянском ГАУ проведены исследования опытного образца отопительной установки аэродинамического нагрева с целью получения исходных данных для реализации полученной математической модели. Составлено уравнение теплового баланса установки за бесконечно малый промежуток времени. На основании решения полученного дифференциального уравнения построены искомые зависимости. Их анализ и сравнение с опытными данными показали, что полученная математическая модель позволяет прогнозировать температуру теплоносителя и температуру воздуха в отапливаемом помещении в зависимости от параметров установки, окружающей среды и характеристик помещения с точностью 3,4...6,2%. Результаты исследований позволят определять требуемые параметры отопительной установки в зависимости от заданной температуры в отапливаемом помещении.

Ключевые слова: установка аэродинамического нагрева; прогнозирование температуры теплоносителя; роторный нагрев теплоносителя; отопление животноводческих помещений; уравнение теплового баланса установки; микроклимат

Для цитирования: Купреенко А.И., Исаев Х.М., Безик Д.А., Харченко Д.А., Исаев С.Х. Прогнозирование температуры теплоносителя в отопительной установке аэродинамического нагрева // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 3. С. 27-35. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-3-27-35>

ORIGINAL ARTICLE

Forecasting the temperature of the coolant in an aerodynamic heating system

A.I. Kupreenko¹, K.M. Isaev², D.A. Bezik³, D.A. Kharchenko⁴, S.K. Isaev⁵^{1,2,3,4,5} Bryansk State Agrarian University; Bryansk region, Russia¹ kupreenkoai@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3781-9592>² haf-is@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4912-9908>³ bda20101@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1883-716X>⁴ harchenkodmitri@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0009-0566-6278>⁵ Samir.isaev.94@inbox.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6877-3128>

Abstract. Heating of livestock buildings contributes to the normalization of the indoor climate. However, electric heaters commonly used in such facilities require periodic cleaning of their tubular heating elements, lack a standardized service life, and pose a fire hazard. Water and steam heating systems, on the other hand, involve high installation and maintenance costs. An alternative to these systems is an aerodynamic heating unit, which is simple, reliable, and easy to install. Its operating principle is based on the rotary heating of the coolant (air) within a thermally insulated working chamber equipped with two connecting pipes linked by a heat exchanger duct. To explore the feasibility of using an aerodynamic heating unit in livestock building heating systems, the authors manufactured a prototype and constructed a building model. The study aimed to develop a mathematical model for predicting both the coolant temperature and the resulting indoor air temperature as functions of the installation parameters, environmental conditions, and the thermal characteristics of the building envelope. During the autumn–winter period of 2025, research was conducted at Bryansk State Agrarian University on a prototype aerodynamic heating installation to obtain initial data for implementing the proposed mathematical model. A heat balance equation for the installation was formulated over an infinitesimal time interval. Based on the solution to the resulting differential equation, the desired functional relationships were derived. Analysis of these relationships and their comparison with experimental data demonstrated that the developed mathematical model allows prediction of the coolant and indoor air temperatures with an accuracy ranging from 3.4% to 6.2%, depending on the installation parameters, environmental conditions, and room characteristics. The findings of this study will facilitate the determination of optimal heating installation parameters based on the required indoor temperature.

Keywords: aerodynamic heating installation; heat carrier temperature prediction; rotary heat carrier heating; heating of livestock buildings; equation of the installation's thermal balance; indoor climate

For citation: Kupreenko A.I., Isaev H.M., Bezik D.A., Kharchenko D.A., Isaev S.H. Forecasting the temperature of the coolant in an aerodynamic heating system. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(3):27-35. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-3-27-35>

Введение

Температура воздуха считается одним из основных параметров микроклимата животноводческого помещения [1]. В зависимости от назначения помещения и возраста животных оптимальное значение температуры воздуха обеспечивает необходимый уровень потребления кормов и, соответственно, продуктивность, поддерживает тепловой баланс тела животного и птицы и обеспечивает сохранность их здоровья [2, 3].

В качестве теплогенераторов применяют различного типа отопительные установки: электрокалориферы, тепловентиляторы, обогреваемые коврики, панели и полы, приточно-вытяжные установки типа ПВУ, инфракрасные излучатели [4], блок-боксые теплогенераторы¹, тепловые завесы [5] и др. Дополнительные системы – такие, как озонаторы [6],

пластинчатые теплообменники [7], теплоутилизационные установки [8], тепловые аккумуляторы [9], аэрогидродинамическое кондиционирование воздуха [10, 11], повышающие характеристики используемых систем отопления, имеют свои преимущества и недостатки.

Распространенные электрокалориферные отопительные установки требуют периодической чистки трубчатых электронагревателей (ТЭН), не вырабатывают нормативный срок службы, сжигают кислород вследствие высокой температуры нагрева ТЭНов и являются пожароопасными [12].

Водяные и паровые калориферы требуют подключения к системам теплоснабжения, в связи с чем значительно увеличивается стоимость их монтажа и обслуживания.

¹ Теплогенераторы для отопления: Сайт. URL: <https://teplo-power.ru/product/teplogenerator-dlya-otopleniya> (дата обращения 11.12.2025).

В качестве надежной, простой по конструкции и удобной в монтаже отопительной системой может служить установка аэродинамического нагрева (рис. 1) [13]. В ее основе заложен роторный нагрев теплоносителя (воздуха) в теплоизолированной рабочей камере с двумя присоединительными патрубками, замкнутыми воздуховодом-теплообменником [14]. За счет аэродинамических потерь

в проточной части ротора-нагревателя и торможения воздушного потока на выходе из него 85...95% потребляемой электрической энергии трансформируется в тепловую².

Для исследования возможности использования установки аэродинамического нагрева в отопительных системах изготовлены ее опытный образец и макет помещения (рис. 2).

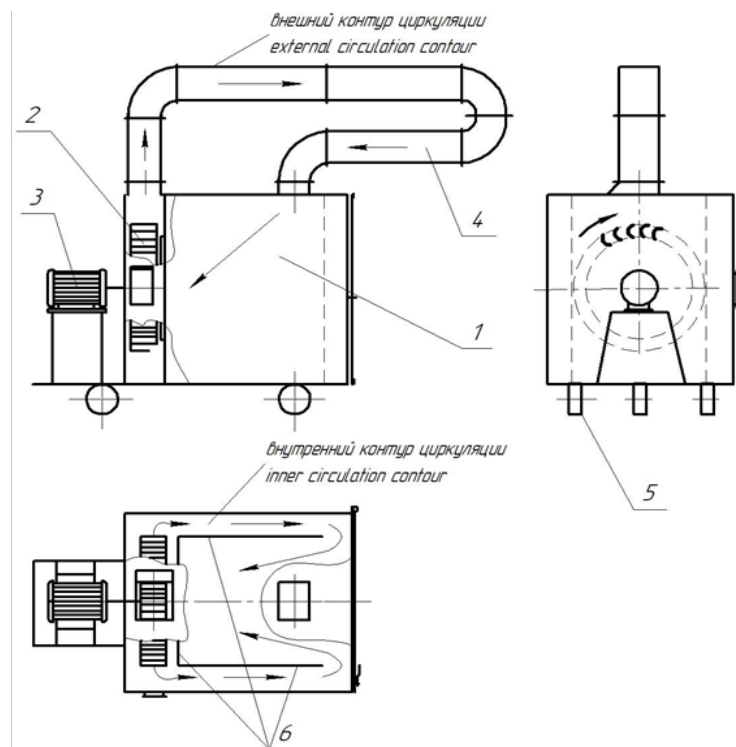


Рис. 1. Схема установки аэродинамического нагрева:

1 – рабочая камера ротора-нагревателя; 2 – ротор-нагреватель; 3 – электродвигатель ротора-нагревателя;
4 – воздуховод-теплообменник; 5 – опорные колеса установки; 6 – экраны рабочей камеры

Fig. 1. Design of an aerodynamic heating installation:

1 – working chamber of the rotor-heater; 2 – rotor-heater; 3 – electric motor of the rotor-heater;
4 – air duct-heat exchanger; 5 – support wheels of the installation; 6 – screens of the working chamber



а



б

Рис. 2. Установка аэродинамического нагрева с макетом помещения:

а – общий вид установки; б – вид воздуховода-теплообменника

Fig. 2. Installation of aerodynamic heating with a room layout:

а – general view of the installation; б – view of the air duct-heat exchanger

²Тевис П.И., Ананьев В.А., Шадек Е.Г. Рециркуляционные установки аэродинамического нагрева / Под общ. ред. Е.Г. Шадека. М.: Машиностроение, 1986. 208 с.

Цель исследований: разработка математической модели прогнозирования температуры теплоносителя и температуры воздуха в отопляемом помещении в зависимости от параметров установки, окружающей среды и характеристик ограждений помещения (стен, пола, потолка, двери и т.д.).

Материалы и методы

Используя подход, аналогичный в работе [15], и уравнение теплового баланса установки аэродинамического нагрева при замкнутом тракте воздуховода-теплообменника, определим температуру теплоносителя за бесконечно малый промежуток времени dt :

$$dQ_{\text{рн}} = dQ_{\text{т}} + dQ_{\text{ст}} + dQ_{\text{в}} + dQ_{\text{пу}} + dQ_{\text{з}} + dQ_{\text{пз}}, \text{ кДж}, \quad (1)$$

где $dQ_{\text{рн}}$ – количество теплоты, выделившейся в рабочей камере установки в результате трансформации потребленной электроэнергии; $dQ_{\text{т}}$ – количество теплоты, предназначенной для нагрева теплоносителя; $dQ_{\text{ст}}$ – количество теплоты для установки и стенок теплообменника; $dQ_{\text{в}}$ – количество теплоты для нагрева воздуха в помещении; $dQ_{\text{пу}}$ – потери теплоты в окружающую среду через наружные стенки установки; $dQ_{\text{з}}$ – потери теплоты на нагрев ограждений отопляемого помещения; $dQ_{\text{пз}}$ – потери теплоты в окружающую среду через ограждения отопляемого помещения.

Количество теплоты, выделившейся в рабочей камере установки в результате трансформации потребленной электроэнергии, можно определить по формуле:

$$dQ_{\text{рн}} = N(1 - \eta)dt = k_0 dt, \quad (2)$$

где N – потребляемая мощность на привод ротора-нагревателя, кВт; η – КПД ротора-нагревателя;

$$k_0 = N(1 - \eta). \quad (3)$$

Количество теплоты, предназначенной для нагрева теплоносителя:

$$dQ_{\text{т}} = c_{\text{в}} V_{\text{т}} \rho_{\text{т}} \Delta T_{\text{т}}(t) dt, \quad (4)$$

где $c_{\text{в}}$ – удельная массовая теплоемкость теплоносителя, кДж/(кг·°C); $V_{\text{т}}$ – объем теплоносителя в замкнутом контуре установки, м³; $\rho_{\text{т}}$ – плотность теплоносителя, кг/м³; $\Delta T_{\text{т}}(t)$ – приращение температуры теплоносителя в процессе работы установки, °C/c; t – время работы установки аэродинамического нагрева, с.

На основании данных монографии П.В. Акулича³, удельная массовая теплоемкость теплоносителя

в зависимости от его влагосодержания определяется по формуле:

$$c_{\text{в}} = \frac{c_{\text{с.в.}} + xc_{\text{п}}}{1 + x}, \quad (5)$$

где $c_{\text{с.в.}}$ – средняя изобарная теплоемкость сухого воздуха, кДж/(кг·°C); x – влагосодержание теплоносителя, кг/кг с.в.; $c_{\text{п}}$ – средняя изобарная теплоемкость водяного пара, кДж/(кг·°C).

На основании имеющихся опытных данных, с момента включения установки и до выхода ее на стационарный режим приращение температуры теплоносителя можно представить эмпирической зависимостью (коэффициент детерминации $R^2 = 0,9428$):

$$\Delta T_{\text{т}}(t) = a_{\text{т}} t^2 + b_{\text{т}} t + c_{\text{т}}, \quad (6)$$

где $a_{\text{т}}$, $b_{\text{т}}$, $c_{\text{т}}$ – эмпирические коэффициенты.

Подставив выражения (5) и (6) в уравнение (4), получим:

$$dQ_{\text{т}} = k_2 t^2 dt + k_3 t dt + k_4 dt, \quad (7)$$

$$\text{где } k_1 = \frac{c_{\text{с.в.}} + xc_{\text{п}}}{1 + x} V_{\text{т}} \rho_{\text{т}}; k_2 = k_1 a_{\text{т}}; k_3 = k_1 b_{\text{т}}; k_4 = k_1 c_{\text{т}}.$$

Количество теплоты для нагрева установки и стенок теплообменника –

$$dQ_{\text{ст}} = M_{\text{ст}} c_{\text{ст}} dT_{\text{ст}} + M_{\text{вс}} c_{\text{ст}} dT_{\text{вс}} + M_{\text{нс}} c_{\text{ст}} dT_{\text{нс}}, \quad (8)$$

где $M_{\text{ст}}$, $M_{\text{вс}}$, $M_{\text{нс}}$ – масса, соответственно, стенок теплообменника, ротора и внутренних стенок установки, наружных стенок установки, кг; $c_{\text{ст}}$ – теплоемкость материала установки и стенок теплообменника, кДж/(кг·°C); $dT_{\text{ст}}$, $dT_{\text{вс}}$, $dT_{\text{нс}}$ – приращение, соответственно, температуры стенок теплообменника, ротора и внутренних стенок установки, наружных стенок установки, °C.

Примем, что температуры стенок теплообменника, ротора и внутренних стенок установки, наружных стенок установки находятся в прямой зависимости от температуры теплоносителя, то есть

$$T_{\text{ст}}(t) = a_{\text{ст}} T_{\text{т}}(t) + b_{\text{ст}}, \quad (9)$$

(коэффициент детерминации $R^2 = 0,998$);

$$T_{\text{вс}}(t) = a_{\text{вс}} T_{\text{т}}(t) + b_{\text{вс}}, \quad (10)$$

(коэффициент детерминации $R^2 = 0,9922$);

$$T_{\text{нс}}(t) = a_{\text{нс}} T_{\text{т}}(t) + b_{\text{нс}}, \quad (11)$$

(коэффициент детерминации $R^2 = 0,9995$);

где $a_{\text{ст}}$, $a_{\text{вс}}$, $a_{\text{нс}}$, $b_{\text{ст}}$, $b_{\text{вс}}$, $b_{\text{нс}}$ – эмпирические коэффициенты.

Из выражений (9-11)

$$dT_{\text{ст}} = a_{\text{ст}} dT_{\text{т}}(t); \quad (12)$$

$$dT_{\text{вс}} = a_{\text{вс}} dT_{\text{т}}(t); \quad (13)$$

$$dT_{\text{нс}} = a_{\text{нс}} dT_{\text{т}}(t). \quad (14)$$

³ Акулич П.В. Расчеты сушильных и теплообменных установок. Минск: Беларус. навука, 2010. 443 с.

Тогда с учетом выражений (12-14) уравнение (8) будет иметь вид:

$$dQ_{\text{ст}} = c_{\text{ст}} (M_{\text{ст}} a_{\text{ст}} + M_{\text{вс}} a_{\text{вс}} + M_{\text{нс}} a_{\text{нс}}) dT_{\text{т}}(t) = k_5 dT_{\text{т}}(t), \quad (15)$$

$$\text{где } k_5 = c_{\text{ст}} (M_{\text{ст}} a_{\text{ст}} + M_{\text{вс}} a_{\text{вс}} + M_{\text{нс}} a_{\text{нс}}). \quad (16)$$

Количество теплоты, предназначенной для нагрева воздуха в помещении,

$$dQ_{\text{в}} = \alpha(t) F \Delta T_{\text{в}}(t) dt, \quad (17)$$

где $\alpha(t)$ – коэффициент теплоотдачи, кВт/(м²·°C); F – площадь поверхности воздуховода-теплообменника, м²; $\Delta T_{\text{в}}(t)$ – температурный напор, °C.

Коэффициент теплоотдачи на основании данных монографии П.В. Акулича⁴ можно представить в виде:

$$\alpha(t) = \frac{N_{u_{\text{в}}}(t) \lambda_{\text{в}}}{d}, \quad (18)$$

где $N_{u_{\text{в}}}(t)$ – критерий Нуссельта; $\lambda_{\text{в}}$ – коэффициент теплопроводности воздуха, кВт/(м·°C); d – эквивалентный диаметр воздуховода-теплообменника, м.

Для горизонтальной трубы при конвективной теплоотдаче и критерии Рейнольдса $Re < 10^5$ можно принять следующую критериальную зависимость:

$$N_{u_{\text{в}}}(t) = 0,5 (Gr_{\text{в}}(t) Pr_{\text{в}})^{0,25} \left(\frac{Pr_{\text{в}}}{Pr_{\text{с}}} \right)^{0,25}, \quad (19)$$

где $Gr_{\text{в}}(t)$ – критерий Грасгофа; $Pr_{\text{в}}$, $Pr_{\text{с}}$ – критерий Прандтля для значений температуры воздуха в ядре потока и температуры стенки воздуховода-теплообменника.

Значение критерия Грасгофа определяется по формуле:

$$Gr_{\text{в}}(t) = \frac{gd^3}{\nu^2} \beta \Delta T_{\text{в}}(t), \quad (20)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²; ν – кинематическая вязкость воздуха, м²/с; β – температурный коэффициент объемного расширения, К⁻¹.

После запуска в работу установки аэродинамического нагрева температурный напор имеет переменное значение, которое можно представить в виде зависимости (коэффициент детерминации $R^2 = 0,8671$):

$$\Delta T_{\text{в}}(t) = a_y t^{b_y}, \quad (21)$$

где a_y, b_y – эмпирические коэффициенты.

Тогда выражение (18) с учетом формул (19-21) будет иметь вид:

$$\alpha = k_6 t^{0,25 b_y}, \quad (22)$$

$$\text{где } k_6 = 0,5 \frac{\lambda_{\text{в}}}{d} \left(\frac{gd^3}{\nu^2} \beta a_y \frac{Pr_{\text{в}}^2}{Pr_{\text{с}}} \right)^{0,25}.$$

⁴ Акулич П.В. Расчеты сушильных и теплообменных установок. Минск: Беларус. навука, 2010. 443 с

Выражение (17) после подстановки в него выражений (21, 22) и соответствующих преобразований будет иметь вид:

$$dQ_{\text{в}} = k_7 t^{k_8} dt, \quad (23)$$

где $k_7 = k_6 F a_y$; $k_8 = 1,25 b_y$.

Потери теплоты в окружающую среду через стенки установки при нахождении ее за пределами отапливаемого помещения –

$$dQ_{\text{пу}} = k_y F_{\text{нс}} (T_{\text{т}}(t) - T_0) dt, \quad (24)$$

где k_y – коэффициент теплопередачи через стенки установки, кВт/(м²·°C); $F_{\text{нс}}$ – площадь наружных стенок установки, м²; T_0 – температура окружающей среды, °C.

Коэффициент теплопередачи через стенки установки определяется по формуле:

$$k_y = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{в}}} + \frac{\delta_{\text{вс}}}{\lambda_{\text{с}}} + \frac{\delta_{\text{и}}}{\lambda_{\text{и}}} + \frac{\delta_{\text{нс}}}{\lambda_{\text{с}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{н}}}}, \quad (25)$$

где $\alpha_{\text{в}}$, $\alpha_{\text{н}}$ – коэффициенты теплоотдачи, соответственно, с внутренней и наружной стенок установки, кВт/(м²·°C); $\delta_{\text{вс}}$, $\delta_{\text{и}}$, $\delta_{\text{нс}}$ – толщина, соответственно, внутренних стенок, теплоизоляции и наружных стенок установки, м; $\lambda_{\text{с}}$, $\lambda_{\text{и}}$ – коэффициенты теплопроводности стенок установки и теплоизоляции, кВт/(м·°C). Тогда выражение (24) с учетом выражений (11) и (25) будет иметь вид:

$$dQ_{\text{пу}} = (k_9 T_{\text{т}}(t) + k_{10}) dt, \quad (26)$$

$$\text{где } k_9 = \frac{F_{\text{нс}} a_{\text{нс}}}{\frac{1}{\alpha_{\text{в}}} + \frac{\delta_{\text{вс}}}{\lambda_{\text{с}}} + \frac{\delta_{\text{и}}}{\lambda_{\text{и}}} + \frac{\delta_{\text{нс}}}{\lambda_{\text{с}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{н}}}}; k_{10} = \frac{F_{\text{нс}} (b_{\text{нс}} - T_0)}{\frac{1}{\alpha_{\text{в}}} + \frac{\delta_{\text{вс}}}{\lambda_{\text{с}}} + \frac{\delta_{\text{и}}}{\lambda_{\text{и}}} + \frac{\delta_{\text{нс}}}{\lambda_{\text{с}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{н}}}}.$$

Потери теплоты на нагрев ограждений отапливаемого помещения –

$$dQ_3 = M_3 c_3 dT_{\text{зср}}, \quad (27)$$

где M_3 – масса ограждений отапливаемого помещения, кг; c_3 – теплоемкость ограждений отапливаемого помещения, кДж/(кг·°C); $dT_{\text{зср}}$ – приращение средней температуры ограждений отапливаемого помещения, °C.

Примем, что средняя температура ограждений отапливаемого помещения находится в прямой зависимости от температуры воздуха в помещении (коэффициент детерминации $R^2 = 0,8305$), то есть

$$T_{\text{зср}}(t) = a_3 T_{\text{в}}(t) + b_3, \quad (28)$$

а температура воздуха в помещении находится в прямой зависимости от температуры теплоносителя (коэффициент детерминации $R^2 = 0,9976$):

$$T_{\text{в}}(t) = a_{\text{в}} T_{\text{т}}(t) + b_{\text{в}}, \quad (29)$$

где $a_3, b_3, a_{\text{в}}, b_{\text{в}}$ – эмпирические коэффициенты.

Из выражения (28) с учетом выражения (29) получим:

$$dT_{\text{зсп}} = a_3 a_b dT_{\text{т}}(t). \quad (30)$$

Тогда с учетом выражения (30) уравнение (27) будет иметь вид:

$$dQ_3 = k_{11} dT_{\text{т}}(t), \quad (31)$$

где $k_{11} = M_3 c_3 a_3 a_b$.

Потери теплоты в окружающую среду через ограждения отапливаемого помещения –

$$dQ_{\text{пз}} = k_3 F_3 (T_{\text{в}}(t) - T_0) dt, \quad (32)$$

где k_3 – коэффициент теплопередачи через ограждения помещения, кВт/(м²·°C); F_3 – площадь ограждений помещения, м².

Коэффициент теплопередачи через ограждения помещения определяется по формуле:

$$k_3 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{зв}}} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_{\text{зн}}}}, \quad (33)$$

где $\alpha_{\text{зв}}$, $\alpha_{\text{зн}}$ – коэффициенты теплоотдачи, соответственно, с внутренней и наружной сторон ограждений помещения, кВт/(м²·°C); δ_3 – толщина ограждений помещения, м; λ_3 – коэффициент теплопроводности ограждений помещения, кВт/(м·°C). Тогда выражение (32) с учетом выражений (29) и (33) будет иметь вид:

$$dQ_{\text{пз}} = (k_{12} T_{\text{т}}(t) + k_{13}) dt, \quad (34)$$

$$\text{где } k_{12} = \frac{F_3 a_b}{\frac{1}{\alpha_{\text{зв}}} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_{\text{зн}}}}; k_{13} = \frac{F_3 (b_{\text{а}} - T_0)}{\frac{1}{\alpha_{\text{зв}}} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_{\text{зн}}}}.$$

Подставим полученные выражения составляющих теплового баланса (2), (7), (15), (23), (26),

(31), (33) в уравнение (1) и после преобразований получим:

$$k_{14} dt - k_{15} t^2 dt - k_{16} t dt - k_{17} t^{k_8} dt - k_{18} T dt - dT = 0, \quad (35)$$

$$\text{где } k_{14} = \frac{k_0 - k_4 + k_{10} - k_{13}}{k_5 + k_{11}}; k_{15} = \frac{k_2}{k_5 + k_{11}}; k_{16} = \frac{k_3}{k_5 + k_{11}};$$

$$k_{17} = \frac{k_7}{k_5 + k_{11}}; k_{18} = \frac{k_9 + k_{12}}{k_5 + k_{11}}. \text{ Аппроксимация решения}$$

уравнения (35) методом Эйлера первого порядка имеет вид:

$$T_{\text{т}}(t) = T_0 + (T_{\text{макс}} - T_0) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \quad (36)$$

где $T_{\text{макс}}$ – максимальная температура теплоносителя; τ – постоянная времени.

В осенне-зимний период 2025 г. в Брянском ГАУ были проведены исследования опытного образца отопительной установки аэродинамического нагрева с целью получения исходных данных для реализации полученной математической модели.

Результаты и их обсуждение

Для прогнозирования в процессе работы отопительной установки температуры теплоносителя по выражению (35) и температуры воздуха в помещении по выражению (29) построим искомые зависимости.

Для построения графика (рис. 3) приняты исходные данные, полученные в ходе поисковых опытов и на основании справочных данных, представленных в таблице.

Выражение (36) в численных значениях с учетом исходных данных имеет вид:

$$T = 2,3 + 112 \left(1 - e^{-\frac{t}{2400}} \right). \quad (37)$$

Таблица

Исходные данные

Показатель	Значение
Мощность привода ротора-нагревателя N , Вт	5,8
КПД ротора-нагревателя η	0,1
Объем теплоносителя в замкнутом контуре установки $V_{\text{т}}$, м ³	0,65
Плотность теплоносителя $\rho_{\text{т}}$, кг/м ³	1,2
Средняя изобарная теплоемкость сухого воздуха $c_{\text{с.в.}}$, кДж/(кг·К)	1,01
Влагосодержание теплоносителя (атмосферного воздуха) x , кг/кг	0,007
Средняя изобарная теплоемкость водяного пара $c_{\text{п}}$, кДж/(кг·К)	1,97
Эмпирические коэффициенты:	
$a_{\text{т}}$	$2 \cdot 10^{-10}$
$b_{\text{т}}$	$-4 \cdot 10^{-6}$
$c_{\text{т}}$	0,0212
Масса стенок теплообменника $M_{\text{ст}}$, кг	32

Окончание табл.

Показатель	Значение
Масса ротора и внутренних стенок установки $M_{вс}$, кг	150
Масса наружных стенок установки $M_{нс}$, кг	90
Теплоемкость материала установки и стенок теплообменника $c_{ст}$, кДж/(кг·°C)	0,46
Эмпирические коэффициенты:	
$a_{ст}$	0,7542
$b_{ст}$	-6,6250
$a_{вс}$	0,7331
$b_{вс}$	-4,5650
$a_{нс}$	0,4167
$b_{нс}$	-11,8300
Площадь поверхности воздуховода-теплообменника F , м ²	3,376
Коэффициент теплопроводности воздуха $\lambda_{в}$, кВт/(м·°C)	$2 \cdot 10^{-5}$
Эквивалентный диаметр воздуховода-теплообменника d , м	0,15
Критерий Прандтля для значений температуры воздуха в ядре потока $Pr_{в}$	0,707
Критерий Прандтля для значений температуры стенки воздуховода-теплообменника $Pr_{с}$	0,694
Кинематическая вязкость воздуха ν , м ² /с	$1 \cdot 10^{-5}$
Температурный коэффициент объемного расширения воздуха β , К ⁻¹	0,0037
Эмпирические коэффициенты:	
$a_{у}$	0,3570
$b_{у}$	0,5627
Площадь наружных ограждений установки $F_{нс}$, м ²	6
Температура окружающей среды T_0 , °C	2
Коэффициент теплоотдачи с внутренней стенки установки $\alpha_{в}$, кВт/(м ² ·°C)	0,100
Коэффициент теплоотдачи с наружной стенки установки $\alpha_{нс}$, кВт/(м ² ·°C)	0,002
Толщина внутренних стенок установки $\delta_{вс}$, м	0,001
Толщина теплоизоляции $\delta_{и}$, м	0,050
Толщина наружных стенок установки $\delta_{нс}$, м	0,001
Коэффициент теплопроводности стенок установки $\lambda_{с}$, кВт/(м·°C)	0,046
Коэффициент теплопроводности теплоизоляции $\lambda_{и}$, кВт/(м·°C)	$4 \cdot 10^{-5}$
Масса ограждений отапливаемого помещения M_3 , кг	210
Теплоемкость ограждений отапливаемого помещения c_3 , кДж/(кг·°C)	2,2
Эмпирические коэффициенты:	
a_3	0,4817
b_3	-2,8400
$a_в$	0,4353
$b_в$	-15,3710
Площадь ограждений отапливаемого помещения $F\alpha_3$, м ²	32
Коэффициент теплоотдачи с внутренней стороны ограждений помещения $\alpha_{зв}$, кВт/(м ² ·°C)	0,020
Коэффициент теплоотдачи с наружной стороны ограждений помещения $\alpha_{зн}$, кВт/(м ² ·°C)	0,006
Толщина ограждений помещения δ_3 , м	0,01
Коэффициент теплопроводности ограждений помещения λ_3 , кВт/(м·°C)	0,00015

Анализ данных рисунка 3 показывает, что полученная модель изменения температуры теплоносителя адекватно описывает опытную зависимость с точностью 3,4% в конце рассматриваемого периода работы установки. Для оценки сходимости теоретической и экспериментальной зависимостей рассчитали коэффициент детерминации $R^2 = 0,9993$.

Аналогично прогнозирование по уравнению регрессии (29) температуры воздуха в помещении в зависимости от температуры теплоносителя дает ошибку 6,2% в конце рассматриваемого периода работы установки. Коэффициент детерминации для данных зависимостей $R^2 = 0,9915$.

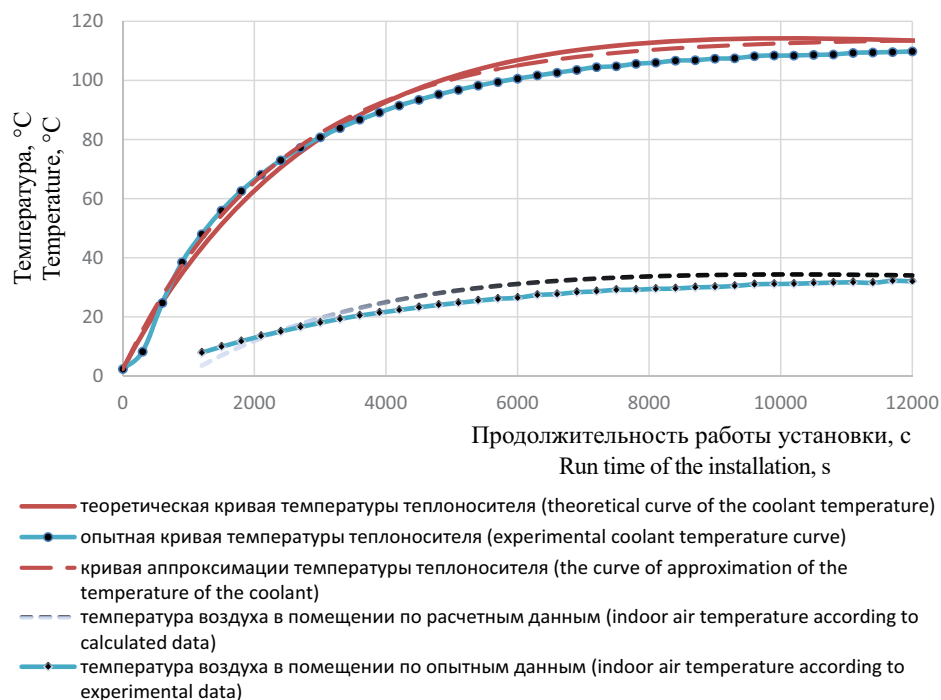


Рис. 3. Изменение температуры теплоносителя и температуры воздуха в помещении в процессе работы установки

Fig. 3. Changes in the temperature of the coolant and the air temperature in the room during the operation of the installation

Выводы

Полученная на основании теплового баланса отопительной установки аэродинамического нагрева математическая модель позволяет прогнозировать температуру теплоносителя и температуру воздуха

в отапливаемом помещении в зависимости от параметров установки, окружающей среды и характеристик ограждений помещения. Прогнозируемые значения температур имеют отклонение на 3,4...6,2% от фактически наблюдаемых.

Список источников

1. Игнаткин И.Ю., Ерохин М.Н., Кирсанов В.В. Определение дальности распространения воздушной струи в струйной системе вентиляции животноводческих объектов // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 3. С. 23-32. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-3-23-32>
2. Ильин И.В., Игнаткин И.Ю., Курячий М.Г. Влияние параметров микроклимата на продуктивность свиней // Перспективное свиноводство: теория и практика. 2011. № 3. С. 21-25. EDN: OKRQPR
3. Самарин Г.Н. Влияние параметров микроклимата на продуктивность кур-несушек // Птица и птицепродукты. 2007. № 2. С. 37-38. EDN: NAZAYH
4. Новиков Н.Н., Колычик И.Е. Современное оборудование и технические средства обеспечения микроклимата на животноводческих фермах // Техника и технологии в животноводстве. 2020. № 1 (37). С. 81-88. EDN: MWDCET
5. Кузьмичев А.В., Тихомиров Д.А., Трунов С.С. Тепловые завесы в системах микроклимата животноводческих ферм // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2019. № 1 (34). С. 14-20. EDN: MMDITR
6. Тихомиров Д.А. Вентиляционно-отопительная установка модульного типа // Сельский механизатор. 2012. № 9. С. 32-33. EDN: PDEEGH
7. Шацкий В.П., Гулевский В.А., Осипов Е.Н. Пластинчатые охладители воздуха водоиспарительного принципа действия // Птицеводство. 2013. № 12. С. 35-37. EDN: PZEBLM
8. Кирсанов В.В., Игнаткин И.Ю. Струйная модель притока вентиляционного воздуха из теплоутилизационной установки // Вестник Федерального государственного

References

1. Ignatkin I.Yu., Erokhin M.N., Kirsanov V.V. Determination of an air jet propagation range in the jet ventilation system of livestock facilities. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(3):23-32 (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-3-23-32>
2. Ilyin I.V., Ignatkin I.Yu., Kuryachiy M.G. Effect of indoor climate parameters on pig productivity. *Perspektivnoe svinovodstvo: teoriya i praktika*. 2011;3:21-25. (In Russ.).
3. Samarin G.N. The influence of microclimate parameters on the productivity of laying hens. *Poultry & Chicken Products*. 2007;2:37-38. (In Russ.)
4. Novikov N.N., Kolchik I.E. The Modern equipment and technical means of microclimate on livestock farms providing. *Machinery and Technologies in Livestock*. 2020;1:81-88. (In Russ.)
5. Kuzmichev A.V., Tikhomirov D.A., Trunov S.S. Heat air curtains in microclimate systems for livestock farms. *Electrical Engineering and Electrical Equipment in Agriculture*. 2019;1:14-20. (In Russ.)
6. Tikhomirov D.A. The ventilation and heating system is modular. *Selskiy mekhanizator*. 2012;9:32-33. (In Russ.)
7. Shatsky V.P., Gulevsky V.A., Osipov E.N. Plate-type air coolers based on the water-evaporation principle. *Ptitsevodstvo*. 2013;12:35-37. (In Russ.)
8. Kirsanov V.V., Ignatkin I.Y. Jet model of ventilation air inflow from a heat recovery unit. *Vestnik of Federal State Educational Establishment of Higher Professional Education "Moscow State Agroengineering University named after V.P. Goryachkin"*. 2018;2:28-32. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1728-7936-2018-2-28-32>

образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». 2018. № 2 (84). С. 28-32. <https://doi.org/10.26897/1728-7936-2018-2-28-32>

9. Тихомиров Д.А., Трунов С.С., Хименко А.В. Энергосберегающая система отопления с применением электрических тепловых аккумуляторов и потолочных вентиляторов // Техника и оборудование для села. 2022. № 2 (296). С. 34-38. EDN: LWUAFU

10. Самарин В.А., Самарин Г.Н. Теоретические основы энергосберегающей технологии формирования микроклимата в животноводческих помещениях // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2010. № 5. С. 36-38. EDN: MWLXFB

11. Ужик В.Ф., Чехунов О.А., Саенко Ю.В., Макаренко А.Н. Поиск инженерных решений по поддержанию оптимальной температуры в коровниках с прозрачной крышей // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. 2018. № 2. С. 34-39. EDN: XREBVJ

12. Маркарянц Л.М., Жиряков А.В. Безопасность электрокалориферных установок // Вестник Брянской ГСХА. 2011. № 6. С. 57-60. EDN: THKUHV

13. Купреенко А.И., Исаев Х.М., Исаев С.Х. и др. Отопление животноводческих помещений установками аэродинамического нагрева // Техника и технологии в животноводстве. 2025. Т. 15, № 3. С. 41-47. EDN: XCAJXF

14. Купреенко А.И., Исаев Х.М., Харченко Д.А. и др. Влияние режимов работы отопительной установки аэродинамического типа на температуру теплоносителя // Техника и технологии в животноводстве. 2026. Т. 16, № 1. С. 29-36. EDN: OWUDFE

15. Купреенко А.И., Безик Д.А., Исаев Х.М. и др. Температура сушильного агента при его рециркуляции в модульной сушилке аэродинамического нагрева // Вестник Брянской ГСХА. 2025. № 3 (109). С. 46-53. EDN: HAOZDI

Информация об авторах

¹ Купреенко Алексей Иванович, д-р техн. наук, профессор; kupreenkoai@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3781-9592>; SPIN-код: 9985-0975

² Исаев Хафиз Мубариз-оглы, канд. экон. наук, доцент, заведующий кафедрой; haf-is@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4912-9908>; SPIN-код: 1420-4155

³ Безик Дмитрий Александрович, канд. техн. наук, доцент, директор института; bda20101@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1883-716X>; SPIN-код: 1052-9774

⁴ Харченко Дмитрий Алексеевич, аспирант; harchenkodmitri@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0009-0566-6278>; SPIN-код: 3590-7009

⁵ Исаев Самир Хафизович, канд. техн. наук, доцент; Samir.isaev.94@inbox.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6877-3128>; SPIN-код: 3228-5096

^{1,2,3,4,5} Брянский государственный аграрный университет; 243365, Российская Федерация, Брянская область, Выгоничский район, с. Кокино, ул. Советская, 2а

Вклад авторов

А.И. Купреенко – концептуализация, проведение исследований; Х.М. Исаев – визуализация, проведение исследований; Д.А. Безик – формальный анализ и верификация данных; Д.А. Харченко – создание черновика рукописи, проведение исследований; С.Х. Исаев – доработка рукописи и ее редактирование.

Конфликт интересов

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

Статья поступила 17.02.2026, после рецензирования и доработки 24.04.2026, принята к публикации 14.05.2026

9. Tikhomirov D.A., Trunov S.S., Khimenko A.V. Energy-saving heating system using electric heat accumulators and ceiling fans. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2022;2:34-38. (In Russ.) <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2022-2-34-38>

10. Samarin V.A., Samarin G.N. Theoretical foundations of energy-saving technology for indoor climate control in livestock breeding. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2010;5:36-38. (In Russ.)

11. Uzhik V.F., Chekhunov O.A., Saenko Yu.V., Makarenko A.N. Search for engineering solutions to maintain optimal temperature in barns with a transparent roof. *Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta mekhanizatsii zhivotnovodstva*. 2018;2:34-39. (In Russ.)

12. Markaryants L.M., Zhiryakov A.V. Safety electroheaters installations. *Vestnik Bryanskoy GSKhA*. 2011;6:57-59. (In Russ.)

13. Kupreenko A.I., Isaev Kh.M., Isaev S.Kh. et al. Heating of livestock premises by aerodynamic heating's units. *Machinery and Technologies in Livestock*. 2025;15(3):41-47. (In Russ.)

14. Kupreenko A.I., Isaev Kh.M., Kharchenko D.A. et al. Influence of the operating modes of an aerodynamic type heating installation on the heat carrier temperature. *Machinery and Technologies in Livestock*. 2026;16(1):29-36. (In Russ.)

15. Kupreenko A.I., Bezik D.A., Isaev Kh.M. et al. Temperature of the drying agent during its recirculation in aerodynamic heating modular dryer. *Vestnik Bryanskoy GSKhA*. 2025;3:46-53. (In Russ.)

Author Information

Aleksei I. Kupreenko¹, DSc (Eng), Professor; kupreenkoai@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3781-9592>

Khafiz Mubariz-ogly Isaev², CSc (Econ), Associate Professor; haf-is@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4912-9908>

Dmitry A. Bezik³, CSc (Eng), Associate Professor; bda20101@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1883-716X>

Dmitry A. Kharchenko⁴, postgraduate student; harchenkodmitri@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0009-0566-6278>

Samir Kh. Isaev⁵, CSc (Eng), Associate Professor; Samir.isaev.94@inbox.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6877-3128>

^{1,2,3,4,5} Bryansk State Agrarian University, Russian Federation, Bryansk region, Vygonichi district, Kokino, Sovetskaya Str., 2a

Author Contribution

A.I. Kupreenko – conceptualization; investigation; H.M. Isaev – visualization; investigation; D.A. Bezik – formal analysis; verification; D.A. Kharchenko – writing – original draft; investigation; S.Kh. Isaev – writing – manuscript review and editing.

Conflict of interests

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

Received 17.02.2026; Revised 24.04.2026; Accepted 14.05.2026

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.354.2

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-3-36-41>

Сепарация свободного зерна посредством барабана-ускорителя зерноуборочного комбайна КЗС-1218

В.Н. Ожерельев¹, В.В. Никитин², И.П. Адылин³^{1,2} Брянский государственный аграрный университет; Брянская обл., Россия³ ООО «Брянский завод холодильного оборудования»; Брянская обл., Россия¹ vicoz@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2121-3481>² viktor.nike@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1393-2731>³ ivanpetrovich@adylin.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4735-1935>

Аннотация. Уборка зерна методом очеса на корню позволяет увеличить производительность комбайна в 1,4...1,6 раза при уменьшении расхода ГСМ на 30%. Резервом для улучшения показателей процесса уборки зерна очесом является адаптация комбайна к работе с очесанным зерновым ворохом. В частности, целесообразно выполнить предварительную сепарацию свободного зерна и направить его непосредственно на очистку комбайном, минуя молотильное устройство. Гипотеза исследований заключается в возможности использования в качестве сепаратора барабана-ускорителя комбайна КЗС-1218. Цель исследований заключается в экспериментальной проверке выдвинутой гипотезы. На базе барабана-ускорителя разработана стационарная экспериментальная установка. Эксперимент заключался в определении доли свободного зерна, прошедшего сквозь подбарабанье, в зависимости от частоты вращения барабана (355, 527 и 700 мин⁻¹). Объектом исследований был очесанный ворох озимой пшеницы Московская 56 влажностью 12%, включавший в себя 80% свободного зерна, 10% соломыстых частиц и 10% полосты. Каждый вариант опыта выполнен в трехкратной повторности. В результате установлено, что по мере уменьшения частоты вращения барабана-ускорителя доля зерна, прошедшего сквозь отверстия подбарабана, увеличивается с 88 до 97%. Таким образом, гипотеза экспериментально доказана. При этом имеется резерв для совершенствования параметров конструкции.

Ключевые слова: зерно; уборка зерна методом очеса; комбайн; барабан-ускоритель; подбарабанье; очесанный ворох; сепарация свободного зерна; зерноуборочный комбайн; предварительная сепарация зерна

Финансирование. Авторы признательны Министерству сельского хозяйства Российской Федерации, поддержавшему нашу научную работу финансово (Регистрационный номер НИОКТР: 125122314922-0).

Для цитирования: Ожерельев В.Н., Никитин В.В., Адылин И.П. Сепарация свободного зерна посредством барабана-ускорителя зерноуборочного комбайна КЗС-1218 // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 3. С. 36-41. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-3-36-41>

ORIGINAL ARTICLE

Separation of free grain using the accelerator drum of the KZS-1218 grain harvester

V.N. Ozherelev¹, V.V. Nikitin², I.P. Adylin³^{1,2} Bryansk State Agrarian University; Bryansk region, Russia³ Bryansk Refrigeration Equipment Plant; Bryansk region, Russia¹ vicoz@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2121-3481>² viktor.nike@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1393-2731>³ ivanpetrovich@adylin.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4735-1935>

Abstract. Grain harvesting using the standing stripping method increases combine productivity by a factor of 1.4-1.6 while reducing fuel consumption by 30%. The efficiency of stripping-based grain harvesting can be further enhanced by adapting the combine harvester to operate with stripped grain heap. In particular, it is advisable to pre-separate free grain and direct it to the combine's cleaning unit, bypassing the threshing unit altogether. This study aims to experimentally verify the hypothesis that the accelerator drum of the KZS-1218

combine can function as a separator. A stationary experimental unit was developed based on the accelerator drum. The experiment consisted of determining the proportion of free grain passing through the concave as a function of drum rotation speed (355, 527, and 700 rpm). A stripped heap of Moskovskaya 56 winter wheat with a moisture content of 12%, comprising 80% free grain, 10% straw particles, and 10% chaff, was used as the test material. Each experiment was replicated three times. The results showed that as the accelerator drum speed decreased, the proportion of grain passing through the concave openings increased from 88% to 97%. Thus, the hypothesis was experimentally confirmed. The findings indicate scope for further refinement of the design parameters.

Keywords: grain; grain harvesting by stripping; grain harvester; accelerator drum; stripped heap; free grain separation; grain combine harvester; preliminary grain separation

Funding. The authors are grateful to the Ministry of Agriculture of the Russian Federation for the financial support of the research through a grant (NIOKTR Registration No.: 125122314922-0).

For citation: Ozerelev V.N., Nikitin V.V., Adylin I.P. Separation of free grain using the accelerator drum of the KZS-1218 grain harvester. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(3):36-41. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-3-36-41>

Введение

Несмотря высокий уровень функционального совершенства зерноуборочной техники, достигнутый в результате столетнего опыта практического использования и постоянной работы многих инженерных коллективов, остается потенциальным резерв для ее дальнейшего развития [1, 2]. Важнейшим его направлением является уборка зерна методом очеса на корню и других аналогичных культур [3, 4]. Об этом свидетельствует опыт, приобретенный учеными в различных регионах страны. В частности, доказано, что производительность уборки с применением очесывающих жаток возрастает в 1,4...1,6 раза при повышении рабочей скорости с 6 до 12,5 км/ч, а суммарные потери зерна составляют всего 1,5% при экономии топлива до 30% [5, 6]. Кроме того, уборка зерна методом очеса хорошо сочетается с современными ресурсосберегающими системами земледелия – такими, как система нулевой и полосовой обработки почвы, поскольку за счет очеса растений «на корню» обеспечивается сохранение на поле до 90% их органической массы. В результате этого в условиях засушливых степей улучшается равномерность распределения снега по поверхности поля, что приводит к существенному росту урожайности.

Отметим, что технология очеса зерна на корню предполагает два варианта исполнения. При первом варианте зерно вместе с другими компонентами вороха поступает в молотилку комбайна, а при втором варианте – непосредственно в транспортные средства для перевозки на стационарный пункт сепарации [7, 8]. В кормопроизводстве для пудового хозяйства апробирован способ очеса зерна и колосьев в стадии молочной спелости (и даже в более ранней фазе развития) также

с транспортировкой вороха на стационар для доработки. При этом используется простейший прицепной очесыватель [9].

Концепция уборки зерна очесом на корню с последующей стационарной сепарацией вороха характерна для научной школы Мелитопольского государственного университета [8, 10]. Опыт многолетней работы ученых вуза обобщен в монографии¹.

Для первого варианта (прямого комбайнирования) характерна проблема несоответствия технологической схемы современного зерноуборочного комбайна составу вороха, поступающего в молотилку. Так, при уборке очесом риса свободное зерно составляет 73...82% от массы очесанного вороха [12], при уборке пшеницы – порядка 80% [6, 13]. Поступление в молотильный аппарат свободного зерна не имеет технологической мотивации, поскольку увеличивается степень его дробления и растут непроизводительные энергозатраты на привод барабана.

Очевидно, что решить проблему может удаление из очесанного вороха свободного зерна до его поступления в молотильный аппарат комбайна. Одним из вариантов решения проблемы является сепарация свободного зерна на решетчатом днище наклонной камеры с последующей его подачей на транспортную доску системы очистки комбайна [14]. Конструктивное решение было найдено, и проведены успешные полевые испытания модернизированной очесывающей жатки ОЗОН [15].

Альтернативным вариантом является размещение сепарирующего устройства непосредственно

¹ Леженкин А.Н., Кравчук В.И., Кушнарев А.С. Технология уборки зерновых методом очесывания на корню: состояние и перспективы: Монография. Дослідницьке, 2010. 400 с.

перед молотильным барабаном. Было синтезировано несколько вариантов конструкции, проведены их успешные лабораторные испытания [16]. В частности, установлено, что наибольшая эффективность сепарации достигается при горизонтальном положении сепарирующей решетки.

Монтаж такого сепарирующего устройства на комбайне требует его радикальной перекомпоновки. В связи с этим сформулирована гипотеза исследований, заключающаяся в том, что на выполнение функции предварительной сепарации свободного зерна из очесанного вороха могут быть переориентированы барабан-ускоритель комбайна КЗС-1218 и его подбарабанье (при выполнении соответствующих адаптационных мероприятий). При этом адаптация конструкции к выполнению новой технологической функции не требует радикальной перекомпоновки комбайна.

Аналогичным образом был адаптирован к более эффективной работе с очесанным ворохом комбайн аксиально-роторного типа. Для этого в заходной части ротора были смонтированы планки для предварительной сепарации свободного зерна до его поступления в зону обмолота [12].

Цель исследований: экспериментально проверить выдвинутую научную гипотезу; установить работоспособность сепаратора нового типа и выявить зависимость эффективности его работы от частоты вращения барабана-ускорителя.

Материалы и методы

Объектом исследований является стационарная установка, имитирующая действие заходной части двухбарабанного молотильного устройства комбайна КЗС-1218 (рис. 1).

На сваренной из прокатных профилей раме смонтированы барабан-ускоритель от комбайна КЗС-1218 и подбарабанье, средняя секция которого является сменной. При планировании эксперимента полагаем, что на его следующем этапе будут использоваться четыре варианта подбарабанья: основное, предназначенное для обмолота зерновых-колосовых культур, кукурузное и два варианта измененных (по отношению к первым двум) подбарабанья.

Теория и практика сепарации очесанного вороха на решетчатых поверхностях свидетельствуют о том, что отверстия целесообразно выполнять продольными и сплошными. Серийные подбарабанья снабжены поперечными планками, способствующими более эффективному вымолоту зерна, но тормозящими процесс сепарации. Поскольку при работе с очесанным ворохом проблема вымолота зерна становится



Рис. 1. Монтаж экспериментальной установки

Fig. 1. Installation of the experimental unit



Рис. 2. Общий вид экспериментальной установки:

1 – рама; 2 – барабан-ускоритель; 3 – подбарабанье; 4 – устройство загрузочное; 5, 6 – емкости для сбора прохода и схода соответственно

Fig. 2. General view of the experimental unit:

1 – frame; 2 – accelerator drum; 3 – concave; 4 – loading device; 5, 6 – containers for collecting the passage and exit, respectively

неактуальной, то предполагается в некоторых вариантах дальнейших опытов поперечные планки удалять. В рабочем состоянии экспериментальная установка показана на рисунке 2.

Эксперимент выполнен при неизменном подбарабанье и фиксированном зазоре между ним и барабаном, равным 26 мм. Диаметр барабана-ускорителя составлял 600 мм. Расстояние между прутками подбарабанья соответствовало 12 мм, а между поперечными планками – 55 мм. В вариантах опыта частота вращения барабана варьировалась и принимала значения 355, 527 и 700 мин⁻¹. Выбор уровней

варьирования частоты вращения барабана обусловлен пределами регулирования, заложенными в конструкции молотилки. Регулировка частоты вращения барабана-ускорителя выполнялась при помощи частотного преобразователя Веспер Е4-8400.

Результаты и их обсуждение

Эксперимент проводился следующим образом. После запуска барабана-ускорителя 2 и выхода его на установленный режим работы в загрузочное устройство 4 засыпали заранее собранную из соответствующих компонентов порцию очесанного зернового вороха, содержащего 80% свободного зерна, 10% полowy и 10% соломы. При этом его подача в пересчете на ширину одной секции подбарабана соответствовала пропускной способности молотилки серийного комбайна КЗС-1218 и составляла 4 кг/с.

Объектом исследований был очесанный ворох озимой пшеницы сорта Московская 56, отобранный на учебно-опытном поле ФГБОУ ВО Брянский ГАУ. Влажность зерна составляла 12%. Зазор на входе

в молотильную камеру установки соответствовал 26 мм. Опыт в каждом варианте проводили в трехкратной повторности. Таким образом, получили результаты 9 опытов.

По результату каждой повторности опыта учитывали массу прохода через решетчатую поверхность подбарабана и схода с нее компонентов вороха путем их взвешивания. Для этого из направляющих рамы 1 выдвигали поддон 5, в котором накапливалось зерно и иные наиболее мелкие компоненты прохода, и снимали сетчатый контейнер 6 (рис. 2) с накопленными в нем, как правило, солоmistыми компонентами схода. Доля свободного зерна, прошедшего сквозь отверстия подбарабана, варьировалась в пределах 88...97%.

По полученным данным, обработанным в программе *Excel*, построен график (рис. 3), характеризующий зависимость доли свободного зерна, прошедшего сквозь отверстия подбарабана, от частоты вращения барабана-ускорителя.

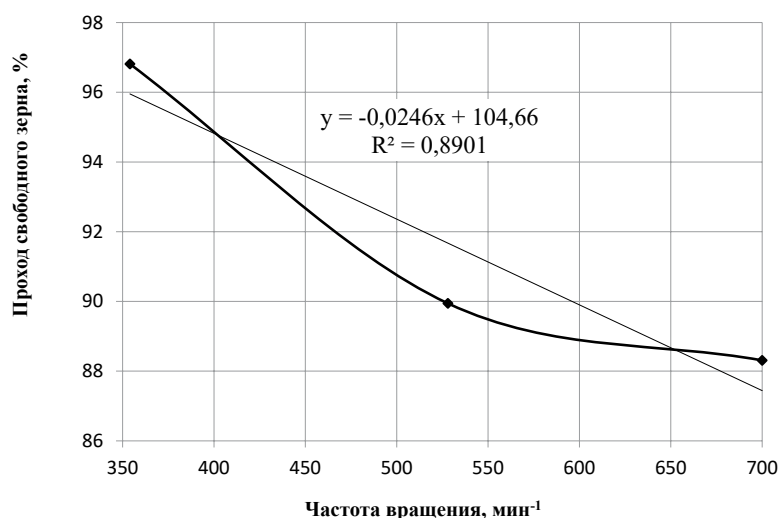


Рис. 3. Влияние частоты вращения барабана-ускорителя зерноуборочного комбайна КЗС-1218 на проход свободного зерна сквозь отверстия подбарабана

Fig. 3. Influence of the accelerator drum speed of the KZS-1218 grain harvester on the passage of free grain through the concave openings

Выводы

1. Результаты эксперимента свидетельствуют об уменьшении прохода свободного зерна сквозь отверстия подбарабана по мере увеличения частоты вращения барабана-ускорителя. Максимальный проход свободного зерна (96,81%) наблюдается при минимальной частоте вращения барабана-ускорителя, равной 355 мин⁻¹. Таким образом, доказана возможность эффективной сепарации свободного зерна в молотильной камере барабана-ускорителя зерноуборочного комбайна.

2. Дальнейшие исследования целесообразно сосредоточить на оптимизации конструкции подбарабана с точки зрения его сепарирующей способности. В частности, необходимо установить оптимальное расстояние между его прутками, а также влияние на характер процесса зазоров в молотильном пространстве для каждого варианта подбарабана и обмолачиваемой культуры.

3. Целесообразно адаптировать конструкцию барабана-ускорителя к задаче наиболее эффективной сепарации свободного зерна при минимальном его травмировании.

Список источников

1. Lachuga Yu.F., Bur'yanov A.I., Pakhomov V.I., Chervyakov I.V. Adaptation of threshing devices to physical and mechanical characteristics of harvested crops. *Russian Agricultural Sciences*. 2020;46(2):198-201 (in Eng.). <https://doi.org/10.3103/S1068367420020111>
2. Жалнин Э.В., Чаплыгин М.Е. Совершенствование конструкции зерноуборочных комбайнов путем гармонизации их базовых технических параметров // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 3. С. 403-416. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202303.403-416>
3. Беренштейн И.Б., Мельник Д.Ю. Техно-экономическая оценка технологий уборки зерновых культур методом очеса растений на корню // Известия сельскохозяйственной науки Тавриды. 2016. № 6 (169). С. 67-73. EDN: YKQQPN
4. Савин В.Ю. Зависимость степени дробления зерна пшеницы от частоты вращения очесывающего устройства // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2018. № 3. С. 98-102. EDN: YOINDN
5. Жалнин Э.В. Уборка с очесом на корню: за и против // Сельский механизатор. 2013. № 8. С. 10-12. EDN: RCFKAZ
6. Бурьянов А.И., Горячев Ю.О., Бурьянов М.А. Эффективность технологии уборки зерновых культур комбайновым очесом // Тракторы и сельхозмашины. 2016. № 9. С. 34-39. <https://doi.org/10.17816/0321-4443-66222> EDN: WKDVCV
7. Бурьянов А.И., Пасечный Н.И. Обоснование класса комбайна для уборки зерновых методом очеса // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2004. № 4. С. 21-23. EDN: RWAMIF
8. Леженкин А.Н., Леженкин И.А., Коломиец С.М., Рубцов Н.А., Назарова О.П. Теоретический анализ функционирования экспериментального рабочего органа для сепарации очесанного вороха пшеницы // Известия Международной академии аграрного образования. 2023. № 66. С. 50-57. EDN: FYJXRC
9. Брагинец С.В., Бахчевников О.Н., Рудой Д.В. Экономическое обоснование уборки зерновых культур ранних фаз спелости очесом и приготовления корма из необмолоченного вороха // Аграрный вестник Урала. 2024. Т. 24, № 1. С. 128-138. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-01-128-138>
10. Шабанов П.А., Шабанов Н.П. Обмолот на корню – дальнейшее развитие двухфазного способа обмолота зерновых культур // Достижения науки и техники АПК. 2006. № 8. С. 8-9. EDN: HVNCIW
11. Ожерельев В.Н., Никитин В.В., Алакин В.М., Становов С.Н. Исследование параметров очесанного зернового вороха // Техника в сельском хозяйстве. 2013. № 1. С. 7-9. EDN: TZNNGD
12. Ozherelyev V.N., Nikitin V.V., Belous N.M., Torikov V.V. Perspectives of grain pile separation before it enters the thresh-ER. *International Journal of engineering and Technology (UAE)*. 2018;7(2.13):114-116. EDN: BUJYTI
13. Савин В.Ю. Зависимость степени дробления зерна пшеницы от частоты вращения очесывающего устройства // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2018. № 3. С. 98-102. EDN: YOINDN
14. Наклонная камера зерноуборочного комбайна: А.С. 1687078 СССР / Дементьев А.В., Скорик В.И., Пастухов Б.К., Садыков Ж.С., Андрусенко Б.И. № 4689013/15; заявл. 12.05.1989; опубл. 30.10.1991, Бюл. № 40. 5 с. EDN: APWJMQ
15. Ожерельев В.Н., Никитин В.В. Результаты адаптации конструкции комбайна к работе с очесывающей жаткой // Инженерные технологии и системы. 2022. Т. 32, № 2. С. 190-206. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202202.190-206>

References

1. Lachuga Yu.F., Bur'yanov A.I., Pakhomov V.I., Chervyakov I.V. Adaptation of threshing devices to physical and mechanical characteristics of harvested crops. *Russian Agricultural Sciences*. 2020;46(2):198-201 (in Eng.). <https://doi.org/10.3103/S1068367420020111>
2. Zhalnin E.V., Chaplygin M.E. Improving the design of combine harvesters by harmonizing their basic technical parameters. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(3):403-416. (In Russ.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202303.403-416>
3. Berenshtein I.B., Melnik D.Yu. Techno-economic evaluation of the technologies of harvesting of grain crops by the method of tw plants at the root. *Transactions of Taurida Agricultural Science*. 2016;6(169):67-73. (In Russ.)
4. Savin V.Yu. The dependence of the degree of damaging of wheat grain on the rotational velocity of rotary-comb dresser. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2018;3:98-102. (In Russ.)
5. Zhalnin E.V. Cleaning with feathering on the vine: pros and cons. *Selskiy mekhanizator*. 2013;8:10-12. (In Russ.)
6. Buryanov A.I., Goryachev Yu.O., Buryanov M.A. Efficiency of technology of grain harvesting by means of combine stripping. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2016;9:34-39. (In Russ.)
7. Buryanov A.I., Pasechniy N.I. Justification of the class of a combine harvester used for harvesting grain by combining. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva*. 2004;4:21-23. (In Russ.)
8. Lezhenkin A.N., Lezhenkin I.A., Kolomiets S.M., Rubtsov N.A., Nazarova O.P. Theoretical analysis of the functioning of the experimental working body for the separation of the combed heap wheat. *Izvestiya mezhdunarodnoy akademii agrarnogo obrazovaniya*. 2023;66:50-57. (In Russ.)
9. Braginets S.V., Bakhchevnikov O.N., Rudoy D.V. Economical justification of harvesting cereal crops of early ripeness phases by stripping and preparing feed from unthreshed ears. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2024;24(1):128-138. (In Russ.)
10. Shabanov P.A., Shabanov N.P. Standing crop threshing: further development of the two-phase method of grain crop threshing. *Achievements of Science and Technology in Agro-Industrial Complex*. 2006;8:8-10. (In Russ.)
11. Ozherelev V.N., Nikitin V.V., Alakin V.M., Stanovov S.N. Study of the parameters of the stripped grain heap. *Tekhnika v selskom khozyaystve*. 2013;1:7-9. (In Russ.)
12. Ozherelyev V.N., Nikitin V.V., Belous N.M., Torikov V.V. Perspectives of grain pile separation before it enters the thresher. *International Journal of Engineering and Technology (UAE)*. 2018;7(2.13):114-116. (In Russ.)
13. Savin V.Yu. The dependence of the degree of damaging of wheat grain on the rotational velocity of rotary-comb dresser. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2018;3:98-102. (In Russ.)
14. Demytyev A.V., Skorik V.I., Pastukhov B.K. et al. Inclined chamber of grain combine: A.S. 1687078 USSR / No. 4689013/15; applied on May 12, 1989; issued on October 30, 1991, Bulletin, No. 40. 5 p.
15. Ozherelev V.N., Nikitin V.V. The results of the combine design adaptation to work with a stripper header. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(2):190-206. (In Russ.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202202.190-206>
16. Ozhereliev V.N., Nikitin V.V. Comparison of the efficiency of different types of separating devices when strolling grain on the root. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;1:176-182. (In Russ.)

16. Ожерельев В.Н., Никитин В.В. Сопоставление эффективности различных типов сепарирующих устройств при очесе зерна на корню // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения. 2024. № 1 (23). С. 176-182. EDN: UXUOXF

Информация об авторах

- ¹ **Ожерельев Виктор Николаевич**, д-р с.-х. наук, профессор; vicoz@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2121-3481>; SPIN-код: 3423-0991
- ² **Никитин Виктор Васильевич**, д-р техн. наук, доцент; viktor.nike@yandex.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0003-1393-2731>; SPIN-код: 5246-6938
- ³ **Адылин Иван Петрович**, канд. техн. наук, доцент; ivanpetrovich@adylin.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4735-1935>
- ^{1,2} Брянский государственный аграрный университет; 243365, Российская Федерация, Брянская обл., Выгоничский р-н, с. Кокино, ул. Советская, 26
- ³ ООО «БЗХО» Брянский завод холодильного оборудования; 241520, Российская Федерация, Брянская обл., Супонево, Шосейная ул., 44 Ж

Вклад авторов

Ожерельев В.Н. – концептуализация, методология, проведение исследований;

Никитин В.В. – создание черновика рукописи, проведение исследований, доработка рукописи и ее редактирование;

Адылин И.П. – ресурсы, формальный анализ.

Конфликт интересов

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

Статья поступила 17.02.2025, после рецензирования и доработки 21.04.2026, принята к публикации 14.05.2026

Author Information

- Viktor N. Ozherelev**¹, DSc (Ag), Professor; vicoz@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2121-3481>
- Viktor V. Nikitin**^{2✉}, DSc (Ag), Associate Professor; viktor.nike@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1393-2731>
- Ivan P. Adylin**³, CSc (Ag), Associate Professor; ivanpetrovich@adylin.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4735-1935>
- ^{1,2} Bryansk State Agrarian University; 2b Sovetskaya Str., Kokino, Vygonichi district, Bryansk region, 243365, Russian Federation
- ³ BZHO (Bryansk Refrigeration Equipment Plant), ООО: 241520, Russian Federation, Bryansk Region, Suponevo, Shosseynaya Str., 44 ZH

Author Contribution

V.N. Ozherelev – conceptualization, methodology, investigation;

V.V. Nikitin – writing – original draft; investigation; writing – manuscript review and editing;

I.P. Adylin – resources, 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 17.02.2025; Revised 21.04.2026; Accepted 14.05.2026

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.362.36

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-3-42-49>

Агротехническая оценка второй аспирации универсальной зерноочистительной машины

А.Л. Глушков^{1✉}, А.И. Бурков², В.А. Лазыкин³, В.Ю. Мокиев⁴^{1,2,3,4} Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого; г. Киров, Россия¹ glandrey@yandex.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-1448-9930>² burkov.46@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5287-1532>³ ellestar@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3910-8620>⁴ dizel154@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3368-1151>

Аннотация. В результате модернизации зерноочистительной машины МПО-30Р «Велес» в отводе ее пневмосепарирующего канала установлена расширительная камера, после чего сепаратор стал работать в режимах предварительной, первичной и вторичной очистки зерна с выделением фуражной фракции во второй аспирации. Изготовлен опытный образец модернизированной зерноочистительной машины. Исследования проведены с целью оценки процесса функционирования второй аспирации универсальной зерноочистительной машины МПО-30Р-01 «Велес» в производственных условиях. Сепаратор МПО-30Р-01 «Велес» установили в технологическую линию (производительность в семенном режиме работы – до 10 т/ч) зерноочистительно-сушильного комплекса в качестве машины предварительной очистки зерна. Агротехническая оценка второй аспирации проводилась на предварительной очистке ячменя влажностью 18,5% при подаче 6,0 т/ч. Исходным материалом являлся зерновой ворох, прошедший начальную очистку от легких примесей в пневмосепарирующем канале первой аспирации машины МПО-30Р-01 «Велес», от крупных и мелких примесей на соответствующих решетках. Установлено, что применение машины МПО-30Р-01 «Велес» с расширительной камерой в режиме предварительной очистки ячменя обеспечивает эффект осаждения фуражного зерна в расширительной камере 97,3%. В пневмосепарирующем канале второй аспирации эффект выделения легких примесей составил 61,7%, а фуражного зерна – 18,1%, соответственно потери в отходы полноценного зерна 0,002% и фуражного зерна 0,429%. Выделенная фуражная фракция, содержащая 78,30% фуражного и 13,23% полноценного зерна, может использоваться при приготовлении кормов животным. Модернизированная машина МПО-30Р-01 «Велес» рекомендуется для применения на пунктах послеуборочной обработки зерна в качестве универсальной зерноочистительной машины.

Ключевые слова: зерно; зерноочистительная машина; сепаратор; оценка второй аспирации; пневмосепарирующий канал; расширительная камера; эффект осаждения фуражного зерна; легкие примеси; потери

Для цитирования: Глушков А.Л., Бурков А.И., Лазыкин В.А., Мокиев В.Ю. Агротехническая оценка второй аспирации универсальной зерноочистительной машины // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 3. С. 42-49. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-3-42-49>

ORIGINAL ARTICLE

Agrotechnical evaluation of the second aspiration of a universal grain cleaning machine

A.L. Glushkov^{1✉}, A.I. Burkov², V.A. Lazykin³, V.Yu. Mokiev⁴^{1,2,3,4} Federal Agricultural Research Center of the North-East named N.V. Rudnitsky; Kirov, Russia¹ glandrey@yandex.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-1448-9930>² burkov.46@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5287-1532>³ ellestar@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3910-8620>⁴ dizel154@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3368-1151>

Abstract. Following the modernization of the MPO-30R “Veles” grain cleaning machine, an expansion chamber was installed at the outlet of its pneumatic separation channel. As a result, the separator began operating in pre-cleaning, primary cleaning, and secondary cleaning modes, with the separation of the feed grain fraction occurring in the second aspiration system. A prototype of the upgraded machine was subsequently manufactured. This study aimed to evaluate

the operational performance of the second aspiration system of the universal MPO-30R-01 “Veles” grain cleaning machine under real production conditions. The separator was installed as a pre-cleaning unit in the processing line of a grain cleaning and drying complex, with a seed-mode throughput capacity of up to 10 t/h. Agrotechnical evaluation of the second aspiration system was conducted during pre-cleaning of barley with a moisture content of 18.5% at a feed rate of 6.0 t/h. The initial material consisted of grain heap that had already undergone initial separation of light impurities in the pneumatic separation channel of the first aspiration system, as well as the removal of coarse and fine impurities on the corresponding screens. The results showed that when the MPO-30R-01 “Veles” machine with an expansion chamber was used in barley pre-cleaning mode, the feed grain sedimentation effect in the expansion chamber reached 97.3%. In the pneumatic separation channel of the second aspiration system, the light impurity separation effect was 61.7%, while the feed grain separation effect was 18.1%. Correspondingly, losses of sound grain to waste amounted to 0.002%, and losses of feed grain to waste amounted to 0.429%. The separated feed fraction, containing 78.30% feed grain and 13.23% sound grain, is suitable for use in animal feed preparation. The upgraded MPO-30R-01 “Veles” machine is recommended for use at post-harvest grain processing facilities as a universal grain cleaning unit.

Keywords: grain; grain cleaning machine; separator; evaluation of the second aspiration system; pneumatic separation channel; expansion chamber; feed grain sedimentation effect; light impurities; losses

For citation: Glushkov A.L., Burkov A.I., Lazykin V.A., Mokiev V.Yu. Agrotechnical evaluation of the second aspiration of a universal grain cleaning machine. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(3):42-49. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-3-42-49>

Введение

В нашей стране на пунктах послеуборочной обработки зерна широкое распространение получили универсальные зерноочистительные машины, способные работать в режимах предварительной, первичной и вторичной очистки. Как правило, они имеют решетную часть, а также дорешетную и послерешетную аспирации. Представителями данного типа машин являются очистители зерна серий А, М, U и V [1] (PETKUS Technologie GmbH, Германия), универсальные высокопроизводительные сепараторы серии TAS [2, 3] (Buhler GmbH, Германия), очистители-сепараторы NSD¹ [4] (Denis, Франция), высокопроизводительные сепараторы серии UNIVERSAL² (U-60, U-120, U-160, U-250) (KOBlik GROUP, Россия), универсальные воздушно-решетные сепараторы линейки МУЗ³ [5, 6] (Полымя, Республика Беларусь), фракционные очистители зерна семейства ОЗФ⁴ [7-9] (ООО «Осколсельмаш», Россия) и многие другие [10-12].

К универсальным сепараторам относится также воздушно-решетная машина МПО-30Р

«Велес»^{5,6} (Кировское ПКБ – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, Россия), предназначенная для предварительной (до 30 т/ч), первичной (до 15 т/ч) и вторичной (до 8 т/ч) очистки зерна различных культур от примесей [13]. Основным ее недостатком является наличие только одной осадочной камеры. Поскольку в режиме вторичной очистки зерна происходит смешивание выделенных воздушным потоком легких примесей из первой (дорешетной) аспирации и фуражного зерна из второй (послерешетной) аспирации, то в дальнейшем требуется его дополнительная обработка. Для устранения данного недостатка верхняя часть со стороны отвода пневмосепарирующего канала второй аспирации была снабжена расширительной камерой с отражательной перегородкой и устройством вывода фуражного зерна. В ФГБНУ ФНАЦ Северо-Востока проведены экспериментальные исследования и обоснованы основные конструктивные параметры расширительной камеры с учетом габаритных размеров существующей воздушной системы машины МПО-30Р «Велес» [14, 15]. По результатам данных исследований подготовлена конструкторская документация и изготовлен опытный образец модернизированной машины МПО-30Р-01 «Велес» с расширительной камерой.

Цель исследований: оценить процесс функционирования второй аспирации универсальной

¹ Cleaners NSD1, 2 & 3. URL: https://www.denis.fr/media/nsd1_2_3_0220_en.pdf (дата обращения: 19.12.2025).

² UNIVERSAL все модели. URL: <https://koblik.ru/catalog/elevatornoe-oborudovanie/zernoочистительные-машини/universal-vse-modeli/> (дата обращения: 19.01.2026).

³ Воздушно-решетные сепараторы МУЗ. URL: <https://ru.polymya.com/rus/catalog/separatory-zernoочистительные-машини/vozdushno-reshetnye-separatory-muz/> (дата обращения: 20.01.2025).

⁴ Очиститель зерна фракционный ОЗФ-80. URL: <https://осколсельмаш.рф/catalog/ochistitel-zerna-fraktsionnyy-ozf-80-40-20> (дата обращения: 24.12.2025).

⁵ Коньшев Н.Л. Разработка и совершенствование технологических линий и технических средств послеуборочной обработки зерна и семян трав. Киров: ФГБНУ ФНАЦ Северо-Востока, 2018. 348 с. EDN: YATBPF.

⁶ Сычугов Н.П., Сычугов Ю.В., Исупов В.И. Машины, агрегаты и комплексы послеуборочной обработки зерна и семян трав: Монография. Киров: ООО «ВЕСИ», 2015. 404 с.

зерноочистительной машины МПО-30Р-01 «Велес» в производственных условиях.

Материалы и методы

Зерноочистительная машина МПО-30Р-01 «Велес» (рис. 1) состоит из установленных на раме 1 воздушной части, включающей в себя приемную камеру, два пневмосепарирующих канала (ПСК), осадочную 6 и расширительную 7 камеры, вентилятор 5, и решетной части с наклонно установленными нижним 2 и верхним 3 решетными станами, а также механизмов привода. Решетная часть оборудована скребковым транспортером для очистки решет верхнего стана и щеточной тележкой на роликах для очистки решет нижнего стана.

Расширительная камера 13 модернизированной машины МПО-30Р-01 «Велес» (рис. 2) является осадочной камерой гравитационного типа и содержит в своем составе отражательную перегородку 12 и устройство вывода фуражного зерна – шнек 14. Основные конструктивные параметры расширительной камеры: длина $L_k = 0,50$ м; глубина $H_k = 0,60$ м; глубина выходного окна $H_o = 0,20$ м; радиус кривизны отражательной перегородки $R_o = 0,10$ м; глубина входного окна $h_1 = 0,10$ м; глубина отводящего канала $h_2 = 0,12$ м [14].

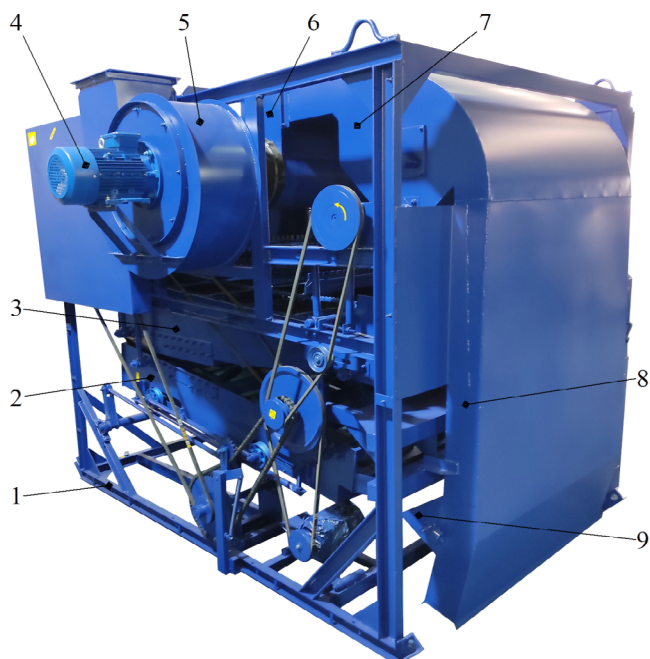


Рис. 1. Зерноочистительная машина МПО-30Р-01 «Велес» (вид справа):

- 1 – рама; 2, 3 – решетные станы; 4 – электродвигатель вентилятора; 5 – вентилятор; 6 – осадочная камера; 7 – расширительная камера; 8 – пневмосепарирующий канал; 9 – приемник зернового материала

Fig. 1. Grain cleaning machine MPO-30R-01 “Veles” (right view):

- 1 – frame; 2, 3 – sieve boots; 4 – fan motor; 5 – fan; 6 – separating chamber; 7 – expansion chamber; 8 – aspiration channel; 9 – receiver of grain material

Рабочий процесс зерноочистительной машины происходит следующим образом. Исходный материал через загрузочную горловину 7 поступает в приемную камеру 6, равномерно распределяется разравнивающим шнеком 5 по ширине воздушной системы, а затем подается в пневмосепарирующий канал 3 первой аспирации, где воздушным потоком из него выделяются легкие примеси. Далее на решетках верхнего решетного стана 2 происходит очистка от крупных примесей, которые через лоток 16 выводятся за пределы машины. Материал, прошедший сквозь отверстия решет верхнего стана 2, поступает на решета нижнего решетного стана 1. Здесь происходит очистка от мелких примесей. Примеси, просыпавшиеся сквозь отверстия решет, по скатному днищу решетного стана 1 направляются в отводящий лоток 20, основной поток материала – через лоток 18 и приемник 19 в ПСК 17 второй аспирации, а после очистки в нем – в разгрузочную воронку (на рисунке не показана). Фуражная фракция, выделенная в рабочей зоне ПСК 17, поднимается вверх в расширительную камеру 13, осаждается в ней и выводится шнеком 14 через материалопровод 15 за пределы машины. Пыль и легкие примеси, выделенные из обрабатываемого материала в ПСК 3 первой аспирации и в расширительной камере 13, поступают в осадочную камеру 11 и из нее вентилятором 8 выносятся в циклон машины (на рисунке не показан).

Агротехническая оценка включала в себя три задачи: определение эффективности выделения легких примесей и фуражного зерна в ПСК второй аспирации и эффективности осаждения фуражного зерна в расширительной камере, подсчет потерь полноценного и фуражного зерна в отходы.

При агротехнической оценке использовали методику, изложенную в ГОСТ 33735-2016⁷. Разбор проб полученных фракций производили вручную при помощи набора лабораторных сит и пневмокласификатора К-293. Взвешивание полученных компонентов фракций осуществляли на лабораторных весах ВЛТК-500М.

Расчет показателей процесса функционирования второй аспирации выполняли по следующим формулам:

– эффект выделения легких примесей в пневмосепарирующем канале:

$$E_{\text{л}} = (1 - a_{\text{л}}^{\text{о}} \cdot p_{\text{о}} / a_{\text{л}}^{\text{и}}) \cdot 100, \%,$$

где $a_{\text{л}}^{\text{о}}$ – содержание легких примесей во фракции очищенного зерна, %; $a_{\text{л}}^{\text{и}}$ – содержание легких примесей в исходном материале, %; $p_{\text{о}}$ – выход фракции очищенного зерна из ПСК;

⁷ГОСТ 33735-2016. Техника сельскохозяйственная. Машины зерноочистительные. Методы испытаний. М.: Стандартинформ, 2017. 54 с.

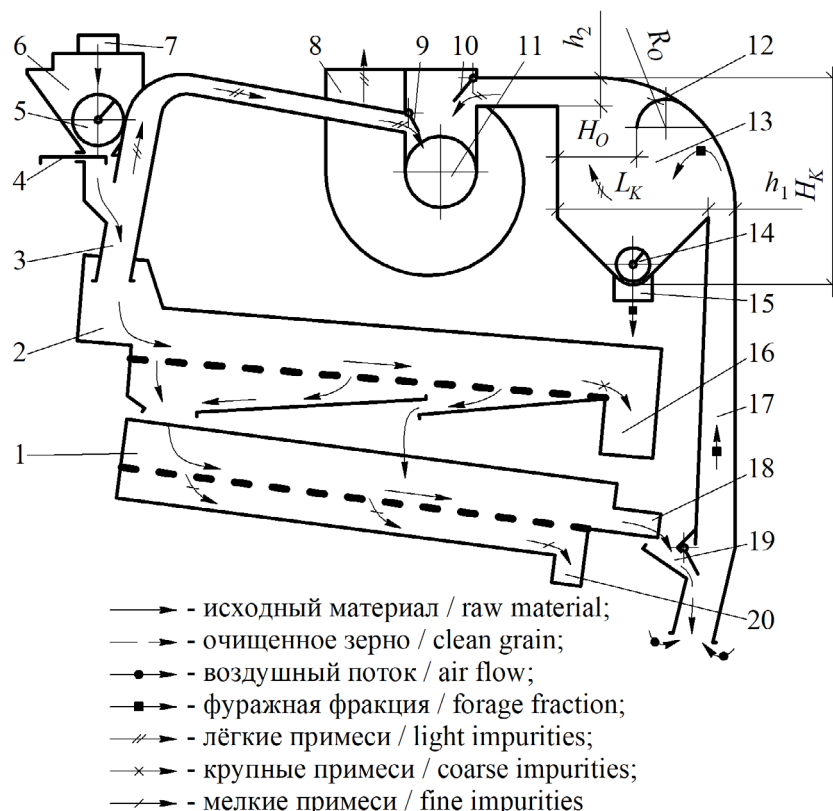


Рис. 2. Технологическая схема зерноочистительной машины МПО-30Р-01 «Велес»:

1, 2 – решетные станы; 3, 17 – пневмосепарирующие каналы; 4, 9, 10 – регулировочные заслонки; 5, 14 – шнеки; 6 – приемная камера; 7 – загрузочная горловина; 8 – вентилятор; 11 – осадочная камера; 12 – отражательная перегородка; 13 – расширительная камера; 15 – материалопровод; 16, 18, 20 – отводящие лотки; 19 – приемник

Fig. 2. Technological diagram of the MPO-30R-01 “Veles” grain cleaning machine:

1, 2 – sieve boots; 3, 17 – aspiration channels; 4, 9, 10 – adjusting valves; 5, 14 – augers; 6 – receiving chamber; 7 – loading neck tube; 8 – fan; 11 – separating chamber; 12 – reflective partition; 13 – expansion chamber; 15 – conveying pipe; 16, 18, 20 – discharge trays; 19 – receiver

– эффект выделения фуражного зерна в пневмосепарирующем канале:

$$E_{\Phi} = (1 - a_{\Phi}^0 \cdot p_0 / a_{\Phi}^I) \cdot 100, \%,$$

где a_{Φ}^0 – содержание фуражного зерна во фракции очищенного зерна, %; a_{Φ}^I – содержание фуражного зерна в исходном материале, %;

– эффект осаждения фуражного зерна в расширительной камере:

$$E_{PK} = 100 \cdot a_{\Phi}^{PK} \cdot p_{PK} / (a_{\Phi}^{PK} \cdot p_{PK} + a_{\Phi}^I \cdot p_{\Pi}), \%,$$

где a_{Φ}^{PK} – содержание фуражного зерна в расширительной камере, %; a_{Φ}^I – содержание фуражного зерна в циклоне, %; p_{PK} – выход фракции фуражного зерна из расширительной камеры; p_{Π} – выход фракции легких примесей из циклона;

– потери полноценного зерна в отходы:

$$\Pi_{\Pi} = 100 \cdot a_{\Pi}^I \cdot p_{\Pi} / a_{\Pi}^I, \%$$

где a_{Π}^I – содержание полноценного зерна в циклоне, %; a_{Π}^I – содержание полноценного зерна в исходном материале, %;

– потери фуражного зерна в отходы:

$$\Pi_{\Phi} = 100 \cdot a_{\Phi}^I \cdot p_{\Pi} / a_{\Phi}^I, \%$$

где a_{Φ}^I – содержание полноценного зерна в исходном материале, %.

Для агротехнической оценки второй аспирации машины МПО-30Р-01 «Велес» в производственных условиях ее опытный образец был установлен в технологическую линию (производительность в семенном режиме работы – до 10 т/ч) зерноочистительно-сушильного комплекса в ООО «Маяк» Удмуртской республики в качестве машины предварительной очистки зерна.

Скорость воздушного потока в ПСК первой аспирации устанавливали по началу выноса фуражного зерна в циклон, в ПСК второй аспирации – по началу выноса полноценного зерна в расширительную камеру. Опыты проводили в трехкратной повторности. Подачу материала в ПСК второй аспирации определяли по сумме выхода очищенного материала в бункере агрегата, фуражного зерна и отходов из расширительной камеры и циклона. Пробы исходного

материала брали на сходе с решета нижнего стана, очищенного зерна – на выходе из ПСК второй аспирации, фуражного зерна – на выходе из материало-провода расширительной камеры, легких примесей – на выходе из циклона.

Агротехническая оценка проводилась на предварительной очистке ярового ячменя сорта Памяти Чепелева влажностью 18,5% при подаче $6,0 \pm 0,1$ т/ч. Исходным материалом являлся сход с решета нижнего решетного стана машины. Это зерновой ворох ячменя, прошедший начальную очистку от легких примесей в ПСК первой аспирации, от крупных и мелких примесей на соответствующих решетах. Характеристика исходного материала представлена в таблице 1. Согласно ГОСТ 28672-2019⁸ к фуражному относили щуплое, мелкое и дробленое зерно ячменя, проходящее через решето с продолговатыми отверстиями размером $2,2 \times 20$ мм.

Результаты классификации компонентов исходного материала по скорости витания представлены на рисунке 3.

Из данных рисунка следует, что вариационные кривые фуражного и полноценного зерна сильно перекрываются. При скорости воздушного потока в зоне сепарации 6,5...7,0 м/с теоретически можно полностью выделить легкие примеси из зернового материала и 10...22% фуражного зерна при незначительных потерях полноценного зерна в отходы (до 0,05%).

Результаты и их обсуждение

Результаты агротехнической оценки второй аспирации машины МПО-30Р-01 «Велес» представлены в таблице 2.

Выход фракции очищенного зерна из пневмосепарирующего канала составил 97,40%, фракции фуражного зерна из расширительной камеры – 2,45%, фракции легких примесей из циклона – 0,15%.

В результате очистки зернового материала в пневмосепарирующем канале второй аспирации содержание полноценного зерна возросло с 88,48 до 90,51%, содержание фуражного зерна снизилось от 10,88 до 9,15%, легких примесей – от 0,48 до 0,19%, других примесей – от 0,16 до 0,15%. Фуражная фракция, осаждаемая в разделительной камере, содержит 78,30% фуражного и 13,23% полноценного зерна; 8,20% легких и 0,27% других примесей. При этом эффект выделения фуражного зерна из исходного материала составил 18,1%.

⁸ГОСТ 28672-2019. Ячмень. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2019. 8 с.

Таблица 1
Характеристика исходного зернового вороха ячменя влажностью 18,5%

Table 1
Characteristics of the original barley grain mass at 18.5% moisture content

Состав вороха	Содержание, %
Полноценное зерно	88,48
Фуражное зерно	10,88
Легкие примеси	0,48
Другие примеси (крупные, мелкие, семена других культур)	0,16

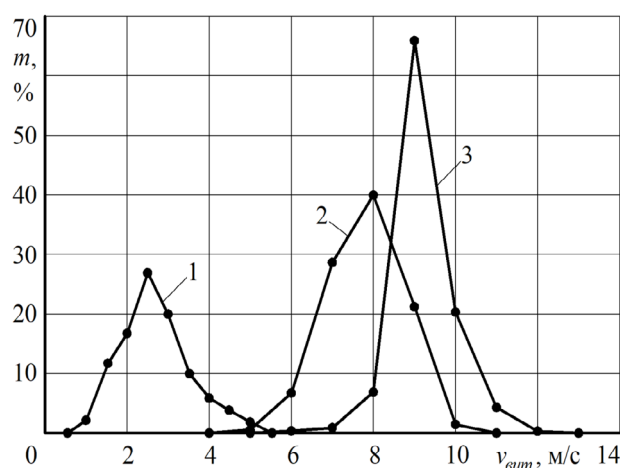


Рис. 3. Вариационные кривые распределения компонентов исходного материала по скорости витания:

1 – легкие примеси; 2 – фуражное зерно;
3 – полноценное зерно

Fig. 3. Variational curves of the distribution of raw material components of the soaring speed:
1 – light impurities; 2 – feed grain; 3 – full-value grain

Потери полноценного зерна в отходы составили 0,002%, что соответствует технологическим требованиям к пневмосепарирующим устройствам на этапе предварительной очистки, – не более 0,05%⁹. Потери фуражного зерна также незначительны (0,429%), что свидетельствует о правильной настройке машины. Эффект выделения легких примесей в пневмосепарирующем канале второй аспирации составил 61,7% при нормативном требовании 50,0% на всю пневмосистему. Эффект осаднения фуражного зерна в расширительной камере имеет довольно высокое значение (97,3%) и соответствует проведенным ранее исследованиям по обоснованию основных конструктивных параметров расширительной камеры, в которых данный показатель составил 97,1% [14].

⁹Ревякин Е.Л., Антышев Н.М. Технологические требования к новым техническим средствам в растениеводстве. М.: Росинформагротех, 2008. 60 с. EDN: QKZVOD

Таблица 2

Результаты агротехнической оценки второй аспирации универсальной зерноочистительной машины МПО-30Р-01 «Велес»

Table 2

Results of the agrotechnical evaluation of the second aspiration of the MPO-30R-01 “Veles” universal grain cleaning machine

Показатель	Значение показателя, %
Характеристика фракции очищенного зерна (выход из пневмосепарирующего канала второй аспирации)	
Выход фракции	97,40
Содержание:	
– полноценного зерна	90,51
– фуражного зерна	9,15
– легких примесей	0,19
– других примесей (крупные, мелкие, семена других культур)	0,15
Характеристика фракции фуражного зерна (выход из расширительной камеры)	
Выход фракции	2,45
Содержание:	
– полноценного зерна	13,23
– фуражного зерна	78,30
– легких примесей	8,20
– других примесей (крупные, мелкие, семена других культур)	0,27
Агротехнические показатели	
Эффект выделения легких примесей в пневмосепарирующем канале	61,7
Эффект выделения фуражного зерна в пневмосепарирующем канале	18,1
Эффект осаждения фуражного зерна в расширительной камере	97,3
Потери полноценного зерна в отходы	0,002
Потери фуражного зерна в отходы	0,429

Выводы

1. Зерноочистительная машина МПО-30Р-01 «Велес» с установленной расширительной камерой длиной 0,50 м и глубиной 0,60 м, имеющей глубину выходного окна 0,20 м, радиус кривизны отрагательной перегородки 0,10 м, глубину входного окна 0,10 м и глубину отводящего канала 0,12 м, показала высокую эффективность очистки зерна.

2. Применение универсальной зерноочистительной машины МПО-30Р-01 «Велес» с расширительной камерой в режиме предварительной

очистки ячменя обеспечивает выделение в пневмосепарирующем канале второй аспирации 61,7% легких примесей и 18,1% фуражного зерна, осаждение в расширительной камере 97,3% фуражного зерна и минимальные потери в отходы полноценного 0,002% и фуражного зерна 0,429%.

3. Выделенная фуражная фракция, содержащая 78,30% фуражного и 13,23% полноценного зерна, может использоваться при приготовлении кормов животным.

Список источников

- Бурков А.И. Тенденции развития воздушно-решетных зерноочистительных машин на современном этапе // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2018. № 2(63). С. 4-15. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2018.63.2.04-15>
- Болотова Н. Очистка зерна // Хлебопродукты. 2010. № 5. С. 32-33. EDN: MSVEUT

References

- Burkov A.I. Trends in development of air screen grain cleaners at present stage. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2018;2(63):4-15. (In Russ.) <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2018.63.2.04-15>
- Bolotova N. Grain cleaning. *Khleboпродукты*. 2010;5:32-33. (In Russ.)

3. Тимченко А. Элеваторное оборудование «Бюлер»: проектируя успех заказчика // Комбикорма. 2019. № 7-8. С. 23-26. EDN: SPWAIY
4. Глушков А.Л. Анализ конструкций и технологического процесса зерноочистительных машин, работающих по пневмофракционной технологии (обзор) // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2025. Т. 26, № 3. С. 519-535. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.3.519-535>
5. Ермаков А.И., Зеленко С.А. Совершенствование аспирационной системы зерноочистительной машины // Вестник Барановичского государственного университета. Серия «Технические науки». 2024. № 1 (15). С. 45-51. EDN: QBZPZD
6. Ермаков А.И., Литвяк В.В., Росляков Ю.Ф. Исследование работы аспирационной системы универсальной зерноочистительной машины МУЗ-16 // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. 2024. № 2. С. 252-259. EDN: GLWEVB
7. Orobinsky V.I., Gievsky A.M., Baskakov I.V., Gulevsky V.A., Chernyshov A.V. Analysis and features of operation of fractional grain cleaners and secondary seed cleaning separators. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;845:012064. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/845/1/012064>
8. Orobinsky V.I., Gievsky A.M., Gulevsky V.A. Prospects for improving the technology of post-harvest grain and seed processing and technical means to implement it. *BIO Web of Conferences*. 2021;37:00140. EDN: LMLGXQ
9. Тишанинов К.Н. Основные тенденции развития зерноочистительной техники // Наука в Центральной России. 2022. № 5 (59). С. 20-27. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2022-5-20-27>
10. Orobinsky V.I., Baskakov I.V., Chernyshov A.V., Gulevsky V.A., Gievsky A.M. Two-aspiration air-sieve grain cleaning machines of new generation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022;954:012056. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/954/1/012056>
11. Маринич Л.А., Михайловский Е.И., Михайловский В.Е. Анализ конструктивно-технологических особенностей машин предварительной и первичной очистки зерна // Агропанорама. 2012. № 3 (91). С. 6-11. EDN: KHAOTW
12. Priporov I.E., Kurasov V.S., Samurganov E.E., Shepelev A.B. Modeling the sunflower seeds separation process in air-sieve grain-cleaning machines. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021;1111:012048. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1111/1/012048>
13. Сычугов Н.П., Савиных П.А., Сычугов Ю.В., Казаков В.А. Технологическая линия и технические средства получения семян многолетних трав // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2020. № 1 (102). С. 72-82. EDN: KQZKNK
14. Глушков А.Л., Бурков А.И., Лазыкин В.А., Мокиев В.Ю. Обоснование конструктивных параметров расширительной камеры второй аспирации зерноочистительной машины МПО-30Р «ВЕЛЕС» // Пермский аграрный вестник. 2024. № 2 (46). С. 4-11. EDN: WOKFTB
15. Пневмосистема зерноочистительной машины: Патент № 2834712 Российская Федерация, МПК В07В4/00(2006.01) / А.И. Бурков, А.Л. Глушков, В.А. Лазыкин, В.Ю. Мокиев; заявл. 26.03.2024; опублик. 13.02.2025; Бюл. № 5. EDN: UGSULH
3. Timchenko A. Buhler elevator equipment: designing the customer's success. *Kombikorma*. 2019;7-8:23-26. (In Russ.)
4. Glushkov A.L. Analysis of the design and technological process of grain cleaning machines operating on pneumatic fractional technology (review). *Agricultural Science Euro-North-East*. 2025;26(3):519-535. (In Russ.) <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.3.519-535>
5. Ermakov A.I., Zelenko S.A. Improving the grain cleaning machine aspiration system. *Vestnik Baranovichskogo gosudarstvennogo universiteta. Series: Tekhnicheskiye nauki*. 2024;1(15):45-51. (In Russ.)
6. Ermakov A.I., Litvyak V.V., Roslyakov Yu.F. Study of the operation of the aspiration system of the universal grain cleaning machine MUZ-16. *Technologies for the Food and Processing Industry of the Agro-Industrial Complex – Healthy Food Products*. 2024;2:252-259. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2311-6447-2024-2-252-259>
7. Orobinsky V.I., Gievsky A.M., Baskakov I.V., Gulevsky V.A., Chernyshov A.V. Analysis and features of operation of fractional grain cleaners and secondary seed cleaning separators. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;845:012064. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/845/1/012064>
8. Orobinsky V.I., Gievsky A.M., Gulevsky V.A. Prospects for Improving the Technology of Post-harvest Grain and Seed Processing and Technical Means to Implement it. *BIO Web of Conferences*. 2021;37:00140.
9. Tishaninov K.N. The main trends in the development of grain cleaning equipment. *Science in the Central Russia*. 2022;5(59):20-27. (In Russ.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2022-5-20-27>
10. Orobinsky V.I., Baskakov I.V., Chernyshov A.V., Gulevsky V.A., Gievsky A.M. Two-aspiration air-sieve grain cleaning machines of new generation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022;954:012056. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/954/1/012056>
11. Marinich L.A., Mikhailovsky E.I., Mikhailovsky V.E. Analysis of design and technological features of machines for the preliminary and primary cleaning of grain. *Agropanorama*. 2012;3(91):6-11. (In Russ.)
12. Priporov I.E., Kurasov V.S., Samurganov E.E., Shepelev A.B. Modeling the sunflower seeds separation process in air-sieve grain-cleaning machines. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021;1111:012048. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1111/1/012048>
13. Sychugov N.P., Savinykh P.A., Sychugov Yu.V., Kazakov V.A. Technological line, machines and equipment for producing perennial grass seeds. *Tekhnologii i tekhnicheskiye sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 2020;1(102):72-82. (In Russ.) <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2020-10229>
14. Glushkov A.L., Burkov A.I., Lazykin V.A., Mokyiev V.Yu. Justification of the design parameters of the expansion chamber of the second aspiration of the MPO-30R “Veles” grain cleaning machine. *Perm Agrarian Journal*. 2024;2(46):4-11. (In Russ.)
15. Burkov A.I., Glushkov A.L., Lazykin V.A., Mokyiev V.Yu. Grain cleaning machine pneumatic system: Patent, No. 2834712 Russian Federation, IPC B07B4/00(2006.01), 2025. (In Russ.)

Информация об авторах

- ¹ Глушков Андрей Леонидович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник; glandrey@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1448-9930>; SPIN-код: 6378-8155
- ² Бурков Александр Иванович, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник; burkov.46@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5287-1532>; SPIN-код: 6469-1959
- ³ Лазыкин Виктор Алексеевич, канд. техн. наук, научный сотрудник; ellestar@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3910-8620>; SPIN-код: 2180-6764
- ⁴ Мокиев Валентин Юрьевич, канд. техн. наук, научный сотрудник; dizel154@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3368-1151>; SPIN-код: 2330-1404
- ^{1, 2, 3, 4} Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого»; 610007, г. Киров, ул. Ленина, 166а, Россия

Вклад авторов

А.Л. Глушков – формальный анализ, верификация данных, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;
 А.И. Бурков – руководство исследованиями, концептуализация, методология;
 В.А. Лазыкин – создание черновика рукописи, ресурсы;
 В.Ю. Мокиев – проведение исследований, ресурсы.

Конфликт интересов

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

Статья поступила 26.01.2026, после рецензирования и доработки 14.04.2026, принята к публикации 14.05.2026

Author Information

- A.L. Glushkov**¹, CSc (Eng), Senior Research Engineer; <https://orcid.org/0000-0002-1448-9930>; glandrey@yandex.ru
- A.I. Burkov**², DSc (Eng), Professor, Chief Research Engineer; <https://orcid.org/0000-0002-5287-1532>; burkov.46@mail.ru
- V.A. Lazykin**³, CSc (Eng), Research Engineer; <https://orcid.org/0000-0002-3910-8620>; ellestar@bk.ru
- V.Yu. Mokiev**⁴, CSc (Eng), Research Engineer; <https://orcid.org/0000-0002-3368-1151>; dizel154@bk.ru
- ^{1, 2, 3, 4} Federal Agricultural Research Center of the North-East named N.V. Rudnitsky; 166a, Lenina Str., Kirov, Russia, 610007

Author Contribution

A.L. Glushkov – formal analysis and data verification, writing – review and editing of the manuscript;
 A.I. Burkov – research supervision, conceptualization, methodology;
 V.A. Lazykin – writing – original draft, resources;
 V.Yu. Mokiev – investigation, resources.

Conflict of interests

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

Received 26.01.2026; Revised 14.04.2026; Accepted 14.05.2026

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 620.193:621.3

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-3-50-57>**Математическая модель электрохимической коррозии токоведущих элементов с учетом локальных параметров среды животноводческих комплексов***А.В. Букреев¹, А.К. Букреева²*^{1,2} Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия¹ vim@aleksey-bukreev.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0209-1167>² mamakhaeva@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8582-1080>

Аннотация. Высокая скорость коррозии электрооборудования на животноводческих комплексах (ЖК) является серьезной проблемой. Для прогнозирования остаточного ресурса электрооборудования ЖК необходимо учитывать пространственно-временную неоднородность концентрации аммиака и сероводорода, температуру и влажность. Исследования направлены на разработку комплексной математической модели, позволяющей прогнозировать скорость электрохимической коррозии токоведущих элементов (меди и алюминия) с учетом меняющихся параметров микроклимата. Предлагаемая модель основана на системе уравнений, объединяющей электрохимические, электрические и тепловые процессы. Для верификации модели использовали установку с климатической камерой, системой точного контроля температуры и влажности, газовым дозатором и газоанализатором «ОКА-Т-Н₂S-NH₃». Проверка адекватности модели заключалась в сравнении расчетных значений скорости коррозии с экспериментальными данными, не использовавшимися при калибровке модели. Исходные данные модели включали в себя физико-химические свойства материалов и значения скорости коррозии меди и алюминия, полученные в климатической камере при варьировании концентраций аммиака (0...50 ppm) и сероводорода (0...20 ppm), температуры (20...30°C) и относительной влажности (70...90%). Установили, что повышение относительной влажности с 70 до 90% приводит к увеличению скорости коррозии в 1,6...2,3 раза в зависимости от материала и состава газовой среды. Выявили чувствительность скорости коррозии меди к концентрации сероводорода (порядок реакции – 0,85) и алюминия к концентрации аммиака (порядок реакции – 0,72). При концентрации аммиака 0...50 ppm и фоновом содержании сероводорода 10 ppm скорость коррозии меди возрастает с 0,11 до 0,26 мм/год, алюминия – с 0,105 до 0,225 мм/год. Для сероводорода в диапазоне 0...20 ppm и фоновом содержании аммиака 20 ppm скорость коррозии меди изменяется от 0,16 до 0,35 мм/год, алюминия – от 0,063 до 0,142 мм/год. Коэффициент детерминации 0,92 свидетельствует о высоком уровне соответствия модели экспериментальным данным. Разработанная модель позволит выявлять остаточный ресурс электрооборудования, прогнозировать рост сопротивления контактов и перейти к предиктивной системе технического обслуживания.

Ключевые слова: скорость коррозии; скорость коррозии электрооборудования; микроклимат; аммиак; сероводород; остаточный ресурс электрооборудования; математическая модель электрохимической коррозии

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ ФНАЦ ВИМ FGUN-2025-0004.

Для цитирования. Букреев А.В., Букреева А.К. Математическая модель электрохимической коррозии токоведущих элементов с учетом локальных параметров среды животноводческих комплексов // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 3. С. 50-57. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-3-50-57>

ORIGINAL ARTICLE

Mathematical model of electrochemical corrosion of current-conducting elements considering local environmental parameters in livestock farms*A.V. Bukreev¹, A.K. Bukreeva²*^{1,2} Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Moscow, Russia¹ vim@aleksey-bukreev.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0209-1167>² mamakhaeva@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8582-1080>

Abstract. The high corrosion rate of electrical equipment in livestock facilities represents a critical operational challenge. To predict the residual service life of such equipment, it is necessary to account for the spatiotemporal heterogeneity of ammonia and hydrogen sulfide concentrations, as well as variations in temperature and humidity. The study aimed

to develop a comprehensive mathematical model for predicting the electrochemical corrosion rate of current-carrying components (copper and aluminum) as a function of changing indoor climate parameters. The proposed model is based on a system of equations that integrates electrochemical, electrical, and thermal processes. For model verification, an experimental setup was employed comprising a climate chamber, a precision control system for temperature and humidity, a gas dispenser, and an OKA-T-H₂S-NH₃ gas analyzer. Validation of the model was performed by comparing calculated corrosion rate values with experimental data that were not used during model calibration. Input data for the model included the physicochemical properties of the materials and the corrosion rates of copper and aluminum obtained under varying conditions within the climate chamber: ammonia concentrations ranging from 0 to 50 ppm, hydrogen sulfide concentrations from 0 to 20 ppm, temperatures from 20 to 30°C, and relative humidity levels from 70 to 90%. The results established that increasing relative humidity from 70% to 90% leads to an increase in corrosion rate by a factor of 1.6 to 2.3, depending on the material and the composition of the gaseous environment. The corrosion rate of copper was found to be particularly sensitive to hydrogen sulfide concentration, with a reaction order of 0.85, while that of aluminum was most sensitive to ammonia concentration, with a reaction order of 0.72. At ammonia concentrations ranging from 0 to 50 ppm and a background hydrogen sulfide concentration of 10 ppm, the corrosion rate of copper increases from 0.11 to 0.26 mm/year, and that of aluminum increases from 0.105 to 0.225 mm/year. For hydrogen sulfide concentrations between 0 and 20 ppm, with a background ammonia concentration of 20 ppm, the corrosion rate of copper varies from 0.16 to 0.35 mm/year, while that of aluminum varies from 0.063 to 0.142 mm/year. A coefficient of determination (R^2) of 0.92 indicates a high level of agreement between the model and experimental data. The developed model will enable the determination of residual service life of electrical equipment, the prediction of contact resistance increase, and the transition to a predictive maintenance system.

Keywords: corrosion rate; corrosion rate of electrical equipment; indoor climate; ammonia; hydrogen sulfide; residual life of electrical equipment; mathematical model of electrochemical corrosion

Funding. The research work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation under the State assignment of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (project No. FGUN-2025-0004).

For citation: Bukreev A.V., Bukreeva A.K. Mathematical model of electrochemical corrosion of current-conducting elements considering local environmental parameters in livestock farms. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(3):50-57. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-3-50-57>

Введение

Эксплуатация электрооборудования в помещениях животноводческих комплексов (ЖК) сопряжена с экстремально высокими темпами коррозионного износа [1, 2]. Агрессивная среда на таких объектах формируется за счет одновременного воздействия повышенной относительной влажности (85...95%), конденсации влаги и высоких концентраций газообразных агентов – таких, как аммиак (NH₃) и сероводород (H₂S) [3, 4]. Эти газы, растворяясь в тонких пленках электролита на поверхности металлов, формируют проводящие коррозионные среды с низким pH, что интенсифицирует процессы электрохимической коррозии [5, 6]. Эффективное управление микроклиматом, включая распределение воздушных потоков и снижение температурного градиента, может способствовать уменьшению локальных концентраций агрессивных агентов [7, 8].

Скорость коррозии электрооборудования имеет значительный экономический масштаб. По данным исследований, ежегодные потери от коррозии в агропромышленном комплексе могут составлять до 15...20% от общей стоимости электрооборудования [9, 10], при этом до 40% всех отказов электротехнического оборудования на ЖК прямо или косвенно

связано с коррозионными процессами. Выход из строя токоведущих частей (шин, контактов автоматических выключателей, клеммных соединений) не только ведет к дорогостоящему ремонту, но и провоцирует возгорание и длительные простои технологических циклов.

Разработка точного инструмента, прогнозирующего остаточный ресурс электрооборудования, является основой для перехода к предиктивной системе технического обслуживания. Такой подход позволяет оптимизировать затраты на ремонт и предотвратить катастрофические последствия отказов критически важных систем – таких, как вентиляция и кормораздача.

Большинство существующих моделей коррозии носят обобщенный характер и не учитывают пространственно-временную неоднородность (локальность) параметров микроклимата внутри ЖК. Например, концентрация аммиака может варьироваться на порядок: от 5...10 ppm в зонах с хорошей вентиляцией до 50...100 ppm и выше вблизи систем навозоудаления и кормораздачи. Неоднородность температурно-влажностного режима приводит к образованию зон с постоянной конденсацией [11]. Перспективным направлением снижения пиковых концентраций агрессивных газов является применение технических решений по очистке воздушных

выбросов непосредственно в местах их интенсивного образования [12].

Для прогнозирования коррозии в атмосферных условиях разработан ряд подходов, каждый из которых обладает ограничениями в контексте специфики животноводческих комплексов. Наиболее распространенные модели, основанные на стандартах (ISO 9223), устанавливают корреляцию между усредненными за длительный период (месяц, год) параметрами среды и скоростью коррозии. Их ключевой недостаток – игнорирование пространственно-временной локальности. Поскольку они оперируют среднеобъемными показателями, то неспособны выявить критические зоны внутри ЖК, где параметры могут на порядок превышать усредненные значения. Это приводит к опасному завышению прогнозируемого ресурса оборудования в наиболее уязвимых местах (у систем навозоудаления, кормораздачи). Использование комбинированных систем вентиляции – таких, как естественно-гибридные, позволяет более эффективно управлять температурой и влажностью, снижая локальные экстремальные значения [8]. Применение потолочных вентиляторов также способствует выравниванию температуры по высоте помещения и улучшению воздухообмена, что может понизить агрессивность среды [7]. Дополнительным методом снижения микробиологической нагрузки и, как следствие, потенциального образования агрессивных компонентов является использование ультрафиолетового оборудования [13].

Детализированные электрохимические модели, основанные на уравнениях Батлера-Фольмера и законах диффузии, описывают физико-химические механизмы коррозии на поверхности металла [14, 15]. Эти модели теоретически более точны, но они неприменимы в условиях ЖК, поскольку не учитывают динамику формирования и состав электролитической пленки. Толщина пленки критически зависит от локальных и мгновенных значений температуры и влажности, которые хаотично меняются в пространстве и времени.

Таким образом, классические модели, учитывающие усредненные данные и сложные электрохимические модели, не в состоянии адекватно прогнозировать скорость деградации в наиболее уязвимых зонах, что создает значительный разрыв между расчетным и фактическим ресурсами работы электрооборудования. Следовательно, необходимо разработать новую детализированную математическую модель, учитывающую физическую обоснованность и реальные условия эксплуатации электрооборудования ЖК. Такая модель должна количественно связать локальные значения концентраций агрессивных агентов и параметров микроклимата с кинетикой электрохимической коррозии металлов.

Цель исследований: разработка комплексной математической модели, позволяющей количественно оценить скорость коррозионно-электрохимической деградации материалов токоведущих частей (медь, алюминий) и контактных соединений в зависимости от локальной концентрации агрессивных агентов и микроклиматических параметров (температуры и относительной влажности воздуха).

Материалы и методы

Разработку математической модели электрохимической коррозии токоведущих элементов в условиях животноводческих комплексов осуществляли с учетом пространственно-временной неоднородности параметров микроклимата. В качестве объекта исследований выбраны основные материалы, применяемые в токоведущих частях электрооборудования, – медь (М1) и алюминий (АД31).

В качестве исходных данных модели использовали экспериментальные значения скорости коррозии меди и алюминия, полученные в климатической камере при варьировании концентраций аммиака (0...50 ppm) и сероводорода (0...20 ppm), температуры (20...30°C) и относительной влажности (70...90%). Учитывали справочные данные о физико-химических свойствах материалов (плотность, удельное электрическое сопротивление, теплоемкость) и параметры микроклимата, характерные для различных зон животноводческих комплексов: кормораздачи, навозоудаления и вентилируемые участки.

Основным ограничением модели является предположение об однородности материала и отсутствии защитных покрытий на поверхности образцов.

Модель строили на основе системы уравнений, объединяющей электрохимические, электрические и тепловые процессы и уравнения скорости коррозии с учетом локальных концентраций агрессивных газов, влажности и температуры. В модель включена функция влияния влажности, описываемая сигмоидальной зависимостью для учета порогового эффекта, и функция временной зависимости для описания нестационарных эффектов, включая торможение процесса растущим слоем продуктов коррозии. В расчете толщины коррозионного слоя учитывали скорость коррозии и плотность металла. На основе полученной толщины слоя определяется рост переходного сопротивления контактных соединений. Модель учитывает также уравнение теплового баланса, связывающее джоулево теплообразование, теплоотвод в окружающую среду и теплоемкость контактного узла для расчета его температуры.

Используемый математический аппарат включает в себя кинетическое уравнение коррозии с учетом C_{NH_3} , C_{H_2S} и порядков реакции, интегральные зависимости для накопления продуктов коррозии и расчета

теплового состояния, а также методы нелинейной регрессии для определения параметров модели по экспериментальным данным. Выходными данными модели являются скорость коррозии, толщина коррозионного слоя, переходное сопротивление контакта и температура контактного соединения.

Экспериментальная база для получения исходных данных и верификации модели включала в себя установку с климатической камерой, системой точного контроля температуры и влажности, газовым дозатором и портативным газоанализатором «ОКА-Т-Н₂S-НН₃». Образцы меди и алюминия размерами 50 x 25 x 2 мм предварительно шлифовали, обезжиривали и взвешивали на аналитических весах с точностью $\pm 0,1$ мг. После экспозиции в течение 720 ч продукты коррозии удаляли в соответствии со стандартом ГОСТ 9.908-85, после чего образцы повторно взвешивали образцы, определяли потерю массы. Каждый эксперимент повторяли трижды для обеспечения статистической значимости.

Результаты и их обсуждение

Коррозионная деградация электрооборудования в условиях животноводческих комплексов представляет собой сложный многофакторный процесс. Для его математического описания предлагаем систему взаимосвязанных уравнений (1), учитывающих электрохимические, химические и физические аспекты:

$$\begin{cases} V_{\text{кор}}(t) = k^0 \cdot (C_{\text{NH}_3})^\alpha \cdot (C_{\text{H}_2\text{S}})^\beta \cdot f(\varphi) \cdot \exp\left(-\frac{E_k}{R \cdot T}\right) \cdot g(t), \\ \delta_{\text{кор}(t)} = \int_t^0 \left[\frac{V_{\text{кор}(\tau)}}{\rho_{\text{мет}}} \right] d\tau, \\ R_k(t) = \left(\frac{\rho_s}{A_{\text{кон}}} \right) \cdot \delta_{\text{кор}}(t), \\ T_{\text{кон}(t)} = \left(\frac{1}{m \cdot c_p} \right) \cdot \int_t^0 [I^2(\tau) \cdot R_{\text{с}(\tau)} - h \cdot A \cdot (T_{\text{кон}(\tau)} - T_c)] d\tau. \end{cases} \quad (1)$$

Определяющим для всей системы является уравнение скорости коррозии ($V_{\text{кор}}(t)$), поскольку оно задает интенсивность коррозионного процесса в зависимости от параметров окружающей среды (C_{NH_3} , $C_{\text{H}_2\text{S}}$, φ , T) и времени t :

$$V_{\text{кор}}(t) = k^0 \cdot (C_{\text{NH}_3})^\alpha \cdot (C_{\text{H}_2\text{S}})^\beta \cdot f(\varphi) \cdot \exp\left(-\frac{E_k}{R \cdot T}\right) \cdot g(t), \quad (2)$$

где k^0 – предэкспоненциальный множитель, кг/(м²·с); C_{NH_3} , $C_{\text{H}_2\text{S}}$ – концентрации аммиака и сероводорода, безразм. (ppm); α , β – порядки реакции по соответствующим компонентам, безразм.; $f(\varphi)$ – функция влияния влажности, безразм.; E_k – энергия активации процесса коррозии, Дж/моль; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); T – температура, К; $g(t)$ – функция временной зависимости, безразм.

Функция влияния влажности ($f(\varphi)$) описывается сигмоидальной зависимостью:

$$f(\varphi) = \frac{1}{[1 + \exp(-k_\varphi \cdot (\varphi - \varphi_{\text{кр}}))]}, \quad (3)$$

где k_φ – коэффициент чувствительности к влажности, 1/%; $\varphi_{\text{кр}}$ – критическое значение относительной влажности, при котором происходит интенсивное образование электролитической пленки на поверхности металла, %.

Временная зависимость скорости коррозии ($g(t)$) определяется выражением:

$$g(t) = t^{\eta-1} \cdot \exp(-\lambda \cdot t), \quad (4)$$

где η – параметр, характеризующий нелинейность процесса во времени; λ – коэффициент, учитывающий тормозящее влияние растущего слоя продуктов коррозии.

Накопление продуктов коррозии описывается уравнением для толщины коррозионного слоя ($\delta_{\text{кор}(t)}$), которое интегрирует скорость коррозии во времени с учетом плотности металла $\rho_{\text{мет}}$. Толщина коррозионного слоя определяется по выражению:

$$\delta_{\text{кор}(t)} = \int_t^0 \left[\frac{V_{\text{кор}(\tau)}}{\rho_{\text{мет}}} \right] d\tau, \quad (5)$$

где $\rho_{\text{мет}}$ – плотность металла, кг/м³; τ – переменная интегрирования (время), с.

Влияние коррозии на электрические характеристики контакта определяется уравнением для переходного сопротивления $R_k(t)$, которое связывает рост сопротивления со скоростью накопления коррозионного слоя через удельное поверхностное сопротивление ρ_s и эффективную площадь контакта $A_{\text{кон}}$.

Для описания роста переходного сопротивления контактных соединений используется уравнение:

$$R_k(t) = \left(\frac{\rho_s}{A_{\text{кон}}} \right) \cdot \delta_{\text{кор}}(t), \quad (6)$$

где ρ_s – удельное поверхностное сопротивление продуктов коррозии, Ом·м; $A_{\text{кон}}$ – эффективная площадь контакта, м²; $\delta_{\text{кор}}$ – толщина коррозионного слоя, м.

Тепловые процессы в контактном соединении описываются уравнением теплового баланса, учитывающим джоулево теплообразование $I^2 \cdot R_c$, теплоотвод в окружающую среду и теплоемкость контактного узла:

$$T_{\text{кон}(t)} = \left(\frac{1}{m \cdot c_p} \right) \cdot \int_t^0 [I^2(\tau) \cdot R_{\text{с}(\tau)} - h \cdot A \cdot (T_{\text{кон}(\tau)} - T_c)] d\tau, \quad (7)$$

где m – масса контактного узла, кг; c_p – удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·К); I – ток нагрузки, А; R_c – сопротивление контакта, Ом; h – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); A – площадь поверхности теплообмена, м²; $T_{\text{кон}}$ – температура контакта, К; T_c – температура окружающей среды, К; τ – переменная интегрирования (время), с.

Комплексная модель позволяет прогнозировать развитие коррозионных процессов в электрооборудовании животноводческих комплексов с учетом взаимного влияния химических, электрических и тепловых факторов.

Рисунки 1, 2 наглядно демонстрируют различное поведение меди и алюминия к агрессивной среде животноводческих комплексов, что важно для выбора материалов и проектирования систем защиты электрооборудования.

Медь более чувствительна к концентрации H_2S , а алюминий – к влажности воздуха (большой разброс между кривыми при разных уровнях влажности). При низких концентрациях H_2S скорость коррозии незначительна, с увеличением концентрации наблюдается экспоненциальный рост. Увеличение влажности с 70 до 90% и концентрации сероводорода 20 ppm приводит к росту скорости коррозии меди с 0,16 до 0,35 мм/год (увеличение – в 2,19 раза), в то время как для алюминия в тех же условиях скорость возрастает с 0,063 до 0,142 мм/год (увеличение – в 2,25 раза).

Алюминий демонстрирует более сильную зависимость от концентрации аммиака, что подтверждается

его высоким порядком реакции (табл.). Для обоих материалов наблюдается степенная зависимость скорости коррозии от концентрации аммиака. Увеличение влажности с 70 до 90% усиливает коррозионное воздействие аммиака на оба материала, но в большей степени – на алюминий. При концентрации аммиака 50 ppm повышение влажности с 70 до 90% приводит к росту скорости коррозии алюминия с 0,11 до 0,26 мм/год (увеличение – в 2,36 раза), в то время как для меди в тех же условиях скорость возрастает с 0,105 до 0,225 мм/год (увеличение – в 2,14 раза). При низких концентрациях аммиака скорость коррозии незначительна, с увеличением концентрации NH_3 наблюдается ускоренный ее рост.

Для определения оптимальных значений параметров модели (k^0 , α , β , E_k , η , λ), обеспечивающих соответствие расчетных и экспериментальных данных, полученные экспериментальные значения скорости коррозии при различных комбинациях концентраций газов, влажности и температуры обрабатывали методами нелинейного регрессионного анализа (табл.).

Порядок реакции позволяет оценить, насколько каждый материал подвержен коррозии в условиях

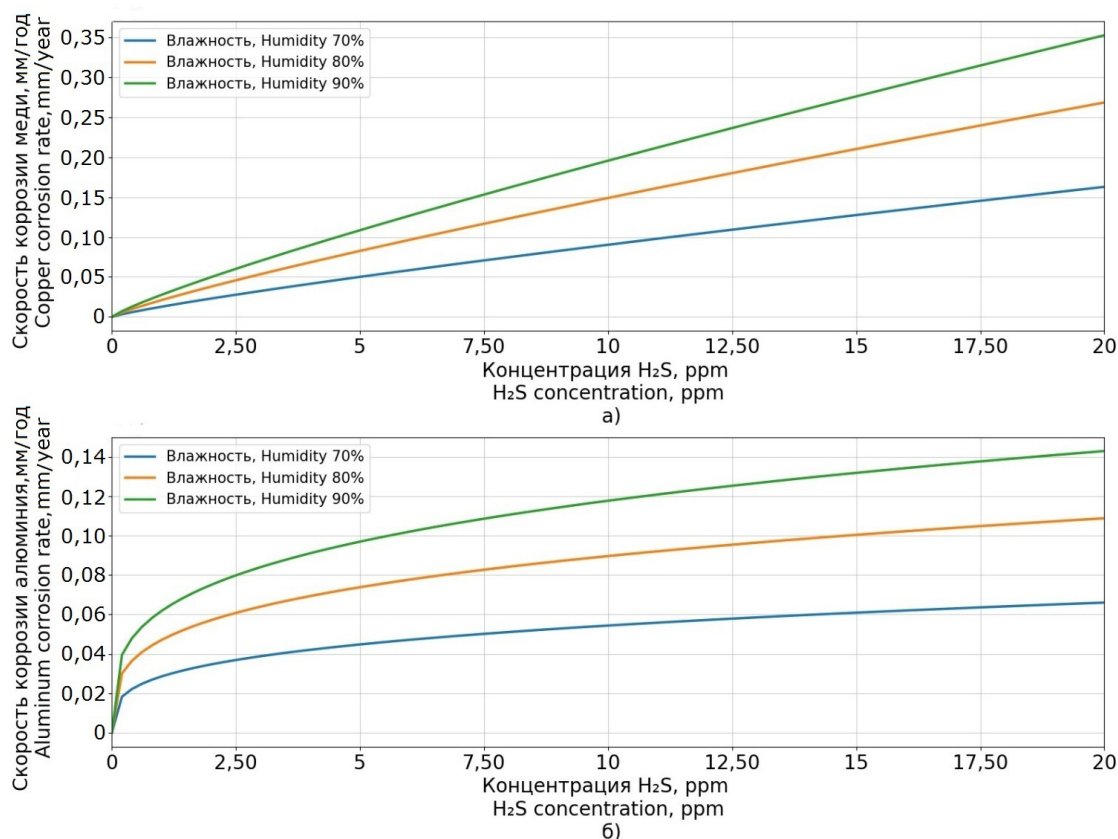


Рис. 1. Зависимость скорости коррозии ($V_{кор}(t)$) меди (а) и алюминия (б) от концентрации сероводорода при различных уровнях влажности ($T = 25^\circ C$; $C_{NH_3} = 20$ ppm)

Fig. 1. Relationship between the corrosion rate ($V_{кор}(t)$) of copper (а) and aluminum (б) and the concentration of hydrogen sulfide at different humidity levels ($T = 25^\circ C$, $C_{NH_3} = 20$ ppm)

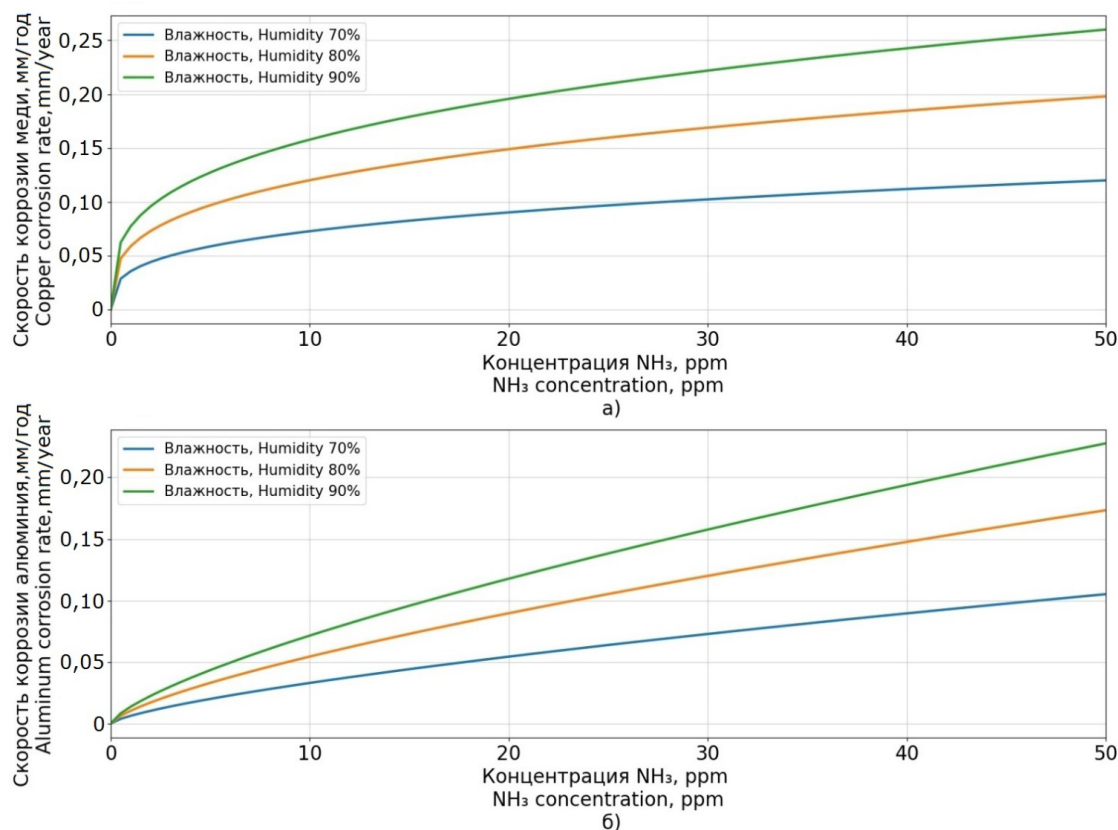


Рис. 2. Зависимость скорости коррозии ($V_{\text{кор}}(t)$) меди (а) и алюминия (б) от концентрации аммиака при различных уровнях влажности ($T = 25^\circ\text{C}$; $C_{\text{H}_2\text{S}} = 10 \text{ ppm}$)

Fig. 2. Relationship between the corrosion rate ($V_{\text{кор}}(t)$) of copper (а) and aluminum (б) and the concentration of ammonia at different humidity levels ($T = 25^\circ\text{C}$; $C_{\text{H}_2\text{S}} = 10 \text{ ppm}$)

варьирования параметров микроклимата и агрессивности среды животноводческих комплексов. Для меди модель демонстрирует наибольшую чувствительность к концентрации сероводорода (параметр $\beta = 0,85$), для алюминия – к аммиаку (параметр $\alpha = 0,72$).

Для проверки адекватности разработанной модели выполнили сравнение расчетных значений скорости коррозии с экспериментальными данными, не использовавшимися при калибровке модели. Верификацию проводили для 30 независимых комбинаций

параметров среды (концентрация газов, влажность, температура) в пределах заданного диапазона. Среднеквадратическое отклонение рассчитанных и экспериментальных значений скорости коррозии составило 0,018 мм/год для меди и 0,014 мм/год для алюминия, что не превышает 15% от средних измеренных величин. Коэффициент детерминации (R^2) для обеих серий экспериментов превысил 0,92, что свидетельствует о высоком уровне соответствия модели экспериментальным данным. Таким образом, модель адекватно описывает кинетику коррозионных процессов

Параметры коррозионной деградации

Таблица

Corrosion degradation parameters

Table

Параметр	Медь	Алюминий
Предэкспоненциальный множитель k^0 , $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	$1,25 \pm 0,15$	$0,89 \pm 0,12$
Порядок реакции по NH_3 , α	$0,31 \pm 0,05$	$0,72 \pm 0,06$
Порядок реакции по H_2S , β	$0,85 \pm 0,07$	$0,28 \pm 0,04$
Энергия активации процесса коррозии E_k , $\text{кДж}/\text{моль}$	$45,2 \pm 3,1$	$39,8 \pm 2,7$
Параметр, характеризующий нелинейность процесса во времени, η	$0,65 \pm 0,04$	$0,78 \pm 0,05$
Коэффициент, учитывающий тормозящее влияние растущего слоя продуктов коррозии λ , год^{-1}	$0,12 \pm 0,02$	$0,08 \pm 0,01$

в условиях, имитирующих среду животноводческих помещений.

Практическая значимость работы заключается в возможности снижения эксплуатационных потерь электрооборудования до 20% за счет своевременного выявления критических зон коррозионного износа и оптимизации затрат на ремонт и замену элементов.

Выводы

1. Разработанная комплексная математическая модель электрохимической коррозии токоведущих элементов (меди и алюминия), учитывающая локальные параметры среды животноводческих комплексов (концентрацию аммиака и сероводорода, относительную влажность и температуру), позволяет количественно оценить скорость коррозионной деградации материалов и ее влияние на элек-

трические и тепловые характеристики контактных соединений.

2. Скорость коррозии меди чувствительна к концентрации сероводорода (порядок реакции $\beta = 0,85$), скорость коррозии алюминия – к концентрации аммиака (порядок реакции $\alpha = 0,72$).

3. Увеличение влажности с 70 до 90% значительно ускоряет коррозионные процессы: скорость коррозии меди возрастает в 2,14...2,19 раза, алюминия – в 2,25...2,36 раза, что связано с интенсивным образованием электролитической пленки на поверхности металлов.

4. Модель позволяет прогнозировать рост переходного сопротивления контактов и их температуры в условиях реальной эксплуатации, что является основой для перехода к предиктивной системе технического обслуживания электрооборудования.

Список источников

1. Oki M., Anawe P.A. A review of corrosion in agricultural industries. *Physical Science International Journal*. 2015;5(4):216-222. <https://doi.org/10.9734/PSIJ/2015/14847>
2. Князева Л.Г., Дорохов А.В., Курьято Н.А., Прохоренков В.Д. Влияние агрессивных атмосфер животноводства на коррозию металлов // Наука в центральной России. 2020. № 1 (43). С. 69-80. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2020-1-69-80>
3. Князева Л.Г., Дорохов А.В., Курьято Н.А. О коррозионных проблемах в сельскохозяйственном производстве // Наука в центральной России. 2021. № 5 (53). С. 79-90. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2021-5-79-90>
4. Александров Д.В., Юферев Л.Ю. Энергосберегающая система защиты от коррозии металлоконструкций сельскохозяйственных объектов // Вестник ВИЭСХ. 2016. № 1 (22). С. 25-29. EDN: VRWBTT
5. Вигдорович В.И., Князева Л.Г., Зазуля А.Н. и др. Использование летучих ингибиторов типа «ИФХАН» для защиты стального оборудования в атмосфере животноводческих помещений // Российская сельскохозяйственная наука. 2017. № 1. С. 55-58. EDN: XTDNYH
6. Вигдорович В.И., Князева Л.Г., Цыганкова Л.Е. и др. Влияние летучего ингибитора ИФХАН-114 на эффективность работы ряда контактных гальванических пар металлов и скорость коррозии их составляющих в атмосфере животноводческих помещений // Российская сельскохозяйственная наука. 2018. № 6. С. 65-69. <https://doi.org/10.31857/S250026270001841-0>
7. Кузьмичев А.В., Тихомиров Д.А., Хименко А.В. Выбор потолочных вентиляторов в системе микроклимата животноводческих помещений // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2025. Т. 19, № 1. С. 69-76. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2025-19-1-69-76>
8. Довлатов И.М., Юрочка С.С. Разработка энергоэффективной системы микроклимата для беспривязного содержания дойного стада // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2021. Т. 15, № 3. С. 73-80. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-3-73-80>
9. Muley N.S., Parihar R.T. Corrosion in Agriculture Instruments and Equipments: Reasons and Solutions. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (JETIR)*. 2022;9(5):477-484
10. Adel O., Mohamed M.E., Khamis E. Thermodynamic, electrochemical and surface characterization

References

1. Oki M., Anawe P.A. A review of corrosion in agricultural industries. *Physical Science International Journal*. 2015;5(4):216-222. <https://doi.org/10.9734/PSIJ/2015/14847>
2. Knyazeva L.G., Dorokhov A.V., Kuryato N.A., Prokhorenkov V.D. Influence of aggressive atmospheres of animal breeding on corrosion of metals. *Science in Central Russia*. 2020;1:69-80. (In Russ.). <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2020-1-69-80>
3. Knyazeva L.G., Dorokhov A.V., Kuryato N.A. About corrosion problems in agricultural production. *Science in Central Russia*. 2021;5:79-90. (In Russ.). <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2021-5-79-90>
4. Aleksandrov D.V., Yuferov L.Yu. Energy saving system for corrosion protection of steel structures in agriculture. *Vestnik VIESKH*. 2016;1:25-29. (In Russ.).
5. Vigdorovich V.I., Knyazeva L.G., Zazulya A.N. et al. Application of a number of volatile inhibitors for protection of agricultural equipment in atmosphere of livestock indoors. *Rossiiskaia selskokhoziaistvennaia nauka*. 2017;1:55-58. (In Russ.).
6. Vigdorovich V.I., Knyazeva L.G., Tsygankova L.E. et al. Influence of the volatile inhibitor ifhan-114 on the efficiency of a number of contact galvanic metal pairs and the rate of corrosion of their constituents in the atmosphere of livestock buildings. *Rossiiskaia selskokhoziaistvennaia nauka*. 2018;6:65-69. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S250026270001841-0>
7. Kuzmichev A.V., Tikhomirov D.A., Khimenko A.V. Selection of ceiling fans for the microclimate system of livestock facilities. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025;19(1):69-76 (In Russ.). <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2025-19-1-69-76>
8. Dovlatov I.M., Yurochka S.S. Development of an energy-efficient microclimate system for dairy herd loose keeping. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2021;15(3):73-80 (In Russ.). <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-3-73-80>
9. Muley N.S., Parihar R.T. Corrosion in Agriculture Instruments and Equipments: Reasons and Solutions. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (JETIR)*. 2022;9(5):477-484.
10. Adel O., Mohamed M.E., Khamis E. Thermodynamic, electrochemical and surface characterization of copper corrosion inhibition in acidic solution using rice straw extract. *Scientific Reports*. 2025;15(1):27753. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-12482-w>

of copper corrosion inhibition in acidic solution using rice straw extract. *Scientific Reports*. 2025;15(1):27753. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-12482-w>

11. Кирсанов В.В., Довлатов И.М., Юрочка С.С., Комков И.В. Разработка параметрической модели определения газового состава воздушной среды (аммиак, сероводород, углекислый газ) животноводческого помещения // *Агроинженерия*. 2023. Т. 25, № 3. С. 13-22. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-13-22>

12. Брюханов А.Ю., Васильев Э.В., Егоров С.А. Техническое решение для очистки выбросов климатически активных газов // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18, № 2. С. 103-110. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2024-18-2-103-110>

13. Юферев Л.Ю. Применение энергосберегающего ультрафиолетового электрооборудования в сельском хозяйстве // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16, № 2. С. 69-75. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-2-69-75>

14. Bard A.J., Faulkner L.R., White H.S. *Electrochemical methods: Fundamentals and Applications*. John Wiley & Sons, 2022. 805 p.

15. Шибков А.А., Кочегаров С.С. Компьютерное и физико-химическое моделирование эволюции фрактального коррозионного фронта // *Компьютерные исследования и моделирование*. 2021. Т. 13, № 1. С. 105-124. <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2021-13-1-105-124>

Информация об авторах

¹ Букреев Алексей Валерьевич, канд. техн. наук, старший научный сотрудник; vim@aleksey-bukreev.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0209-1167>; SPIN-код: 3922-8260, AuthorID: 925007

² Букреева Анжела Канвеевна, канд. техн. наук, старший научный сотрудник; <https://orcid.org/0000-0002-8582-1080>; SPIN-код: 4079-4380, AuthorID: 1039558

^{1,2} Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5

Вклад авторов

А.В. Букреев – концептуализация, методология, формальный анализ, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;

А.К. Букреева – ресурсы, создание черновика рукописи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 22.10.2025, после рецензирования и доработки 10.03.2026, принята к публикации 14.05.2026

11. Kirsanov V.V., Dovlatov I.M., Yurochka S.S., Komkov I.V. Development of a parametric model for determining the gas composition of the air environment (ammonia, hydrogen sulfide, carbon dioxide) of livestock premises. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2023;25(3):13-22. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-13-22>

12. Bryukhanov A.Yu., Vasiliev E.V., Egorov S.A. Technical solution for purifying emissions of climate-active gases. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024;18(2):103-110. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2024-18-2-103-110>

13. Yuferov L.Yu. The use of energy-saving ultra-violet electrical equipment in agriculture. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2022;16(2):69-75. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-2-69-75>

14. Bard A.J., Faulkner L.R., White H.S. *Electrochemical methods: fundamentals and applications*. John Wiley & Sons, 2022. 805 p.

15. Shibkov A.A., Kochegarov S.S. Computer and physical-chemical modeling of the evolution of a fractal corrosion front. *Computer Research and Modeling*. 2021;13(1):105-124. (In Russ.) <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2021-13-1-105-124>

Author Information

Aleksey V. Bukreev¹, CSc (Eng), Senior Research Engineer; vim@aleksey-bukreev.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0209-1167>;

Scopus ID: 57192074502; Researcher ID AAE-1336-2022

Anzhela K. Bukreeva², CSc (Eng), Senior Research Engineer; mamakhava@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8582-1080>;

Scopus ID: 57473516200; Researcher ID AAZ-6062-2020

^{1,2} Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 109428, Russia, Moscow, 1st Institutskiy Proezd Str., 5

Author Contribution

A.V. Bukreev – conceptualization, methodology, formal analysis, writing – manuscript review and editing;

A.K. Bukreeva – resources, writing – original draft.

Conflict of interests

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

Received 22.10.2025; Revised 10.03.2026; Accepted 14.05.2026

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.171

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-3-58-64>**Экспериментальное обоснование энергосберегающих режимов работы комбинированного агрегата АКК-6 в лесостепной зоне ЦЧР****Д.А. Москвичев^{1✉}, А.В. Евграфов², А.С. Гузалов³, Г.Е. Митягин⁴, О.П. Андреев⁵**^{1, 2, 3, 4, 5} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия¹ moskvichev@rgau-msha.ru[✉]; <https://orcid.org/0009-0002-7082-4876>² av.evgrafov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2313-2191>³ guzalov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3526-4332>⁴ mityagin@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2667-9309>⁵ aopmsau@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0738-302X>

Аннотация. Повышение энергоэффективности предпосевной обработки почвы является актуальной задачей в условиях роста стоимости ресурсов. Исследования проведены с целью экспериментального определения оптимальных режимов (глубины и скорости) работы комбинированного агрегата АКК-6, обеспечивающих максимальную урожайность при минимальных энергозатратах. Комбинированный почвообрабатывающий посевной агрегат АКК-6 совмещает рыхлительные лапы, дисковые батареи и кольчато-шпоровый каток. Полевой опыт проведен в 2025 г. в лесостепной зоне, тип почвы – чернозем типичный. В двухфакторном плане эксперимента учитывали глубину обработки 20 и 25 см и скорость движения агрегата 8 и 10 км/ч. Тяговое сопротивление измеряли динамометрической сцепкой, расход топлива – бортовой системой «Технотон», урожайность яровой пшеницы сорта Дарья определяли прямым комбайнированием. Качество обработки почвы оценивали по показателям глыбистости, выравнинности поверхности, урожайности, учитывали агрофизические показатели. Статистическую обработку данных произвели в программах Microsoft Excel и Python (библиотеки SciPy, statsmodels). Установлено, что с увеличением глубины обработки почвы с 20 до 25 см повышаются тяговое сопротивление на ~27% и расход топлива на ~19%. Увеличение скорости с 8 до 10 км/ч привело к снижению удельного расхода топлива на 7...9%, при этом качество обработки почвы ухудшилось: глыбистость увеличилась на 1,0...1,5 балла, выравнинность поверхности снизилась в 1,5...1,7 раза. Максимальная урожайность 44,2 ц/га достигнута при глубине обработки почвы 25 см и скорости движения агрегата 8 км/ч, что на 5,2% выше контроля (20 см и 8 км/ч соответственно). Дисперсионный анализ подтвердил высокую значимость влияния режима обработки почвы на урожайность ($F = 103,71$; $p < 0,001$). С целью снижения энергоемкости и повышения продуктивности яровой пшеницы рекомендуем на почвах чернозема типичного проводить предпосевную обработку комбинированным агрегатом АКК-6 на глубину 24...26 см со скоростью 8...9 км/ч.

Ключевые слова: комбинированный почвообрабатывающий посевной агрегат; ресурсосбережение; тяговое сопротивление; урожайность; энергоэффективность; дисперсионный анализ

Финансирование. Работа выполнена в рамках проекта по созданию и развитию инжинирингового центра РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (соглашение № 075-15-2025-543 от 16 июня 2025 г.).

Для цитирования: Москвичев Д.А., Евграфов А.В., Гузалов А.С., Митягин Г.Е., Андреев О.П. Экспериментальное обоснование энергосберегающих режимов работы комбинированного агрегата АКК-6 в лесостепной зоне ЦЧР // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 3. С. 58-64. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-3-58-64>

ORIGINAL ARTICLE

Experimental justification of energy-saving operating modes of the combined unit AKK-6 in the forest-steppe zone of the Central Chernozem Region**D.A. Moskvichev¹, A.V. Evgrafov², A.S. Guzalov³, G.E. Mityagin⁴, O.P. Andreev⁵**^{1,2,3,4,5} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia¹ moskvichev@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0009-0002-7082-4876>² av.evgrafov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2313-2191>³ guzalov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3526-4332>⁴ mityagin@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2667-9309>⁵ aopmsau@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0738-302X>

Abstract. Improving the energy efficiency of pre-sowing tillage has become an urgent priority in the context of rising input costs. The study aimed to experimentally determine the optimal operating parameters (depth and speed) of the combined AKK-6 tillage implement to achieve maximum crop yield with minimal energy consumption. The AKK-6 combined tillage and seeding implement integrates tines, disk batteries, and a ring-spur roller. Field trials were conducted in 2025 in a forest-steppe zone on typical chernozem soil. A two-factor experimental design examined tillage depths of 20 and 25 cm and operating speeds of 8 and 10 km/h. Draft resistance was measured using a dynamometric hitch, fuel consumption was recorded with a Technoton on-board system, and the yield of Darja spring wheat was determined by direct combine harvesting. Tillage quality was assessed based on cloddiness, surface evenness, yield, and agrophysical properties. Statistical data processing was performed using Microsoft Excel and Python (SciPy and statsmodels libraries). The results showed that increasing tillage depth from 20 to 25 cm raised draft resistance by approximately 27% and fuel consumption by about 19%. Increasing operating speed from 8 to 10 km/h reduced specific fuel consumption by 7-9%; however, tillage quality deteriorated: cloddiness increased by 1.0-1.5 points, and surface evenness decreased by a factor of 1.5-1.7. The maximum yield of 44.2 dt/ha was achieved at a tillage depth of 25 cm and an operating speed of 8 km/h, which is 5.2% higher than the control treatment (20 cm and 8 km/h, respectively). Analysis of variance confirmed the highly significant effect of the tillage mode on the yield ($F = 103.71$; $p < 0.001$). To reduce energy intensity and increase spring wheat productivity on typical chernozem soils, the AKK-6 combined implement is recommended for pre-sowing tillage at a depth of 24-26 cm and a speed of 8-9 km/h.

Keywords: combined tillage and seeding implement; resource saving; draft resistance; yield; energy efficiency; analysis of variance

Funding. This work was carried out within the framework of the project for the establishment and development of the Engineering Center of Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Agreement No. 075-15-2025-543 dated June 16, 2025).

For citation: Moskvichev D.A., Evgrafov A.V., Guzalov A.S., Mityagin G.E., Andreev O.P. Experimental justification of energy-saving operating modes of the combined unit AKK-6 in the forest-steppe zone of the Central Chernozem Region. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(3):58-64. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-3-58-64>

Введение

Повышение энергетической эффективности сельскохозяйственного производства является одной из приоритетных задач агропромышленного комплекса России [1]. В условиях роста цен на топливо и ограничения импортной техники особую актуальность приобретают ресурсосберегающие технологии – в частности, применение комбинированных агрегатов, выполняющих несколько технологических операций за один проход [2]. Сокращение количества проходов техники по полю способствует меньшему уплотнению почвы, снижению потери влаги и совокупных энергозатрат [3].

Эффективность работы комбинированного агрегата зависит от параметров его режима работы – глубины и скорости обработки почвы [4]. Глубина определяет энергоемкость процесса и агротехническое состояние корнеобитаемого слоя, а скорость влияет на качество крошения, производительность и удельный расход топлива [5]. Существующие рекомендации носят часто общий характер и не учитывают специфику почвенно-климатических условий лесостепной зоны Центрально-Черноземного региона (ЦЧР), где вопросы влагообеспеченности и сохранения структуры почвы особенно критичны [6].

Можно ожидать, оптимальное сочетание глубины и скорости работы агрегата АКК-6 обеспечит баланс между минимальными удельными энергозатратами и максимальной урожайностью яровой пшеницы в условиях лесостепной зоны ЦЧР.

Цель исследований: экспериментальное определение оптимальных режимов работы комбинированного агрегата АКК-6 (глубины и скорости) по критериям минимума энергозатрат и максимума урожайности яровой пшеницы в лесостепной зоне ЦЧР.

Научная новизна исследований заключается в комплексной энерго-агрономической оценке режимов работы агрегата АКК-6, впервые проведенной в условиях лесостепной зоны ЦЧР с использованием современных методов измерения (динамометрической сцепки, бортовых систем мониторинга) и статистического анализа.

Материалы и методы

Полевой опыт заложен в апреле 2025 г. на территории Воронежской области (51°28' с.ш., 39°05' в.д.). Почва – чернозем типичный, среднесуглинистый. Климатические условия вегетационного периода яровой пшеницы (апрель-август) характеризовались суммой осадков 285 мм (на 12% ниже нормы) и глубиной промачивания почвы до 45 см. Влажность пахотного слоя (0...20 см) в период обработки составляла 18...20% [7].

Основным объектом исследований являлся комбинированный почвообрабатывающий посевной агрегат АКК-6, агрегируемый трактором МТЗ-1221 через прицепное устройство (поперечную планку). Такая схема обеспечивает корректную передачу тягового усилия и копирование рельефа поля. На рисунке 1 представлена принципиальная схема расположения рабочих органов агрегата АКК-6. Агрегат сочетает рыхлительные лапы, дисковые батареи и кольчато-шпоровый каток.

Схема и методика опыта включали в себя двухфакторный полевой опыт. Фактор А – глубина обработки: 20 и 25 см; фактор Б – скорость движения: 8 и 10 км/ч. Всего 4 варианта режимов работы агрегата, повторность трехкратная. Размещение делянок рендомизированное, площадь учетной делянки – 2 га. Применена адаптированная для лесостепи ЦЧР зональная технология возделывания. Предшественником яровой пшеницы сорта Дарья был пар, поэтому глубокая осенняя обработка не проводилась, и ее влияние на изучаемый фактор исключается.

Предпосевная обработка выполнялась комбинированным агрегатом АКК-6 на глубину 20 и 25 см при скорости 8 и 10 км/ч. Отметим, что традиционная для лесостепи ЦЧР предпосевная культивация проводится на глубину 10...12 см. В рамках поиска энергосберегающих режимов нами опробован вариант, позволяющий совместить рыхление с частичным углублением пахотного слоя – посев рядовым способом с одновременным прикатыванием. Таким образом, в опыте изучали влияние весенней обработки на заданную глубину, а не замену основной обработки [8].

Тяговое сопротивление (P , кН) измеряли динамометрической сцепкой ДКС-5 на контрольных отрезках длиной 100 м в устойчивом режиме движения. Удельный расход топлива (Q , л/га) регистрировали установленной на тракторе бортовой системой мониторинга «Технотон» [9].

Качество обработки почвы оценивали по нескольким показателям: глыбистости G (визуальная оценка по 5-балльной шкале, где 1 – почва хорошо разделена на мелкие комки, 5 – наличие крупных глыб); выравнимости поверхности (определение максимального отклонения от плоскости 2-метровой рейки, укладываемой на поверхность поля, см [10]); урожайности (с учетом прямого комбайнирования каждой делянки комбайном ACROS-595 и пересчета урожая на стандартную влажность 14%). Также учитывали



Рис. 1. Комбинированный почвообрабатывающий посевной агрегат АКК-6: схема расположения рабочих органов

Fig. 1. Combined tillage and seeding implement AKK-6: layout diagram of the working elements

агрофизические показатели (влажность почвы определялась термостатно-весовым методом [11]).

Математическая и статистическая обработка данных произведена методами вариационной статистики с использованием программ Microsoft Excel и Python (библиотеки SciPy, statsmodels) [12]. Оценка достоверности влияния факторов выполнялась с помощью дисперсионного анализа ANOVA для двухфакторного опыта [13]. Различия между средними оценивали по критерию наименьшей существенной разницы (LSD) при уровне значимости $\alpha = 0,05$. Рассчитаны средние арифметические (M), стандартные отклонения (s) и коэффициенты вариации (CV) [14].

Результаты и их обсуждение

Показатели качества и энергозатраты возделывания почвы в зависимости от скорости агрегата АКК-6 и глубины предпосевной обработки почвы представлены в таблице.

Увеличение глубины обработки с 20 до 25 см привело к статистически значимому росту среднего

тягового сопротивления на 27,2% и удельного расхода топлива на 18,8%.

Повышение скорости движения с 8 до 10 км/ч, напротив, способствовало снижению удельного расхода топлива на 7...9% за счет роста производительности, но негативно сказалось на качестве обработки. Глыбистость возросла на 1,0...1,5 балла, а неровность поверхности – в 1,5...1,7 раза (рис. 2).

Наибольшая средняя урожайность 44,2 ц/га получена при глубине обработки 25 см и скорости 8 км/ч (вариант 3) (рис. 3).

С ростом глубины и скорости обработки коэффициент вариации урожайности CV уменьшается:

Режим 1 (20 см и 8 км/ч) – урожайность $42,0 \pm 0,36$ ц/га ($CV = 0,86\%$).

Режим 2 (20 см и 10 км/ч) – урожайность $40,5 \pm 0,26$ ц/га ($CV = 0,65\%$).

Режим 3 (25 см и 8 км/ч) – урожайность $44,2 \pm 0,26$ ц/га ($CV = 0,60\%$).

Режим 4 (25 см и 10 км/ч) – урожайность $42,9 \pm 0,10$ ц/га ($CV = 0,23\%$).

Таблица

Влияние режимов работы агрегата АКК-6 на энергозатраты и качество обработки почвы ($M \pm s$; $n = 3$)

Table

Effect of АКК-6 operating modes on energy consumption and tillage quality ($M \pm s$; $n = 3$)

Режим			Тяговое сопротивление, Р, кН	Удельный расход топлива, Q, л/га	Глыбистость, G, балл	Выравненность, см
№	Глубина, см	Скорость, км/ч				
1 контроль	20	8	$12,5 \pm 0,4$	$22,3 \pm 0,6$	$1,5 \pm 0,2$	$2,1 \pm 0,3$
2	20	10	$11,9 \pm 0,3$	$20,4 \pm 0,5$	$3,0 \pm 0,3$	$3,5 \pm 0,4$
3	25	8	$15,9 \pm 0,5$	$26,5 \pm 0,7$	$1,8 \pm 0,2$	$2,4 \pm 0,3$
4	25	10	$15,1 \pm 0,4$	$24,1 \pm 0,6$	$3,5 \pm 0,3$	$4,0 \pm 0,4$

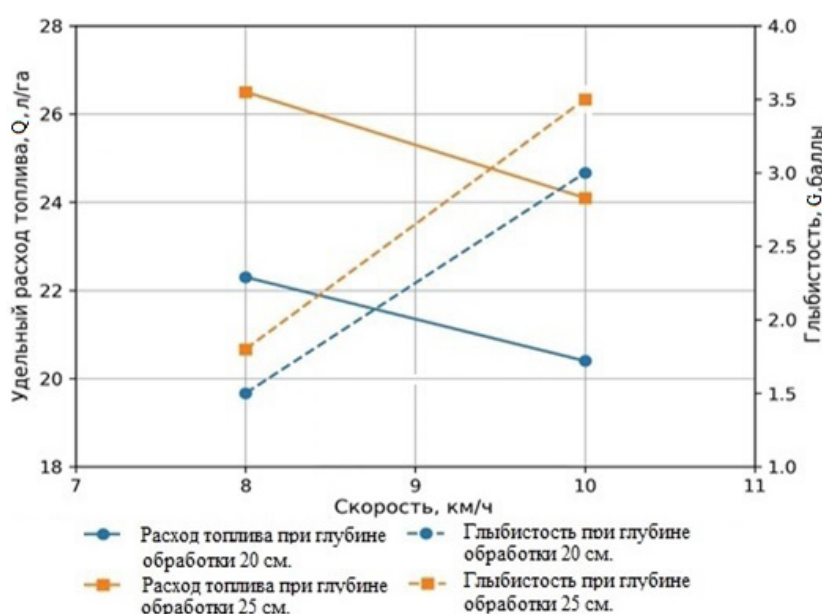


Рис. 2. Влияние скорости и глубины обработки на расход топлива и глыбистость (G) почвы

Fig. 2. Effect of speed and tillage depth on fuel consumption and soil cloddiness (G)

Низкие значения CV (<1%) свидетельствуют о высокой воспроизводимости результатов.

Дисперсионный анализ подтвердил высокую значимость влияния как глубины ($F = 195,4$; $p < 0,001$), так и скорости ($F = 67,8$; $p < 0,001$) на урожайность. Взаимодействие факторов также было значимым ($F = 12,5$; $p < 0,01$). Общее значение F-критерия для модели составило 103,71 при $p \approx 9,62 \cdot 10^{-7}$. Рассчитанное значение $LSD_{0.55}$ для урожайности составило 0,50 ц/га. Таким образом, прибавка урожая на варианте 3 (25 см и 8 км/ч) по сравнению

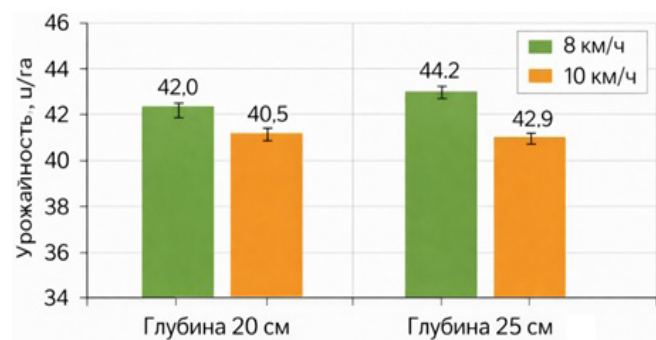


Рис. 3. Урожайность яровой пшеницы в зависимости от глубины и скорости обработки почвы

Fig. 3. Spring wheat yield as a function of tillage depth and speed

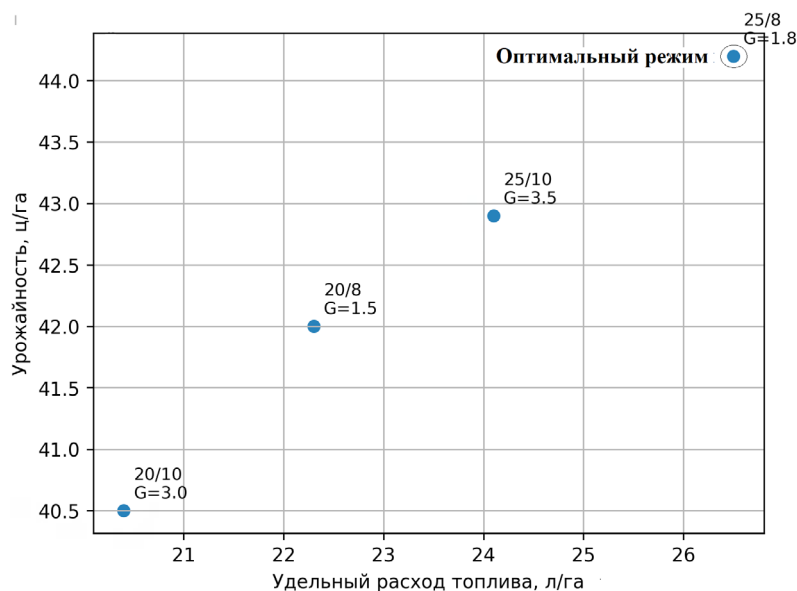


Рис. 4. Зависимость «Энергозатраты – качество обработки – урожайность»

Fig. 4. Relationship “Energy consumption – Tillage quality – Yield”

Выводы

1. Энергоемкость процесса работы агрегата АКК-6 зависит от глубины обработки почвы. Увеличение глубины с 20 до 25 см приводит к достоверному росту тягового сопротивления на ~27% и удельному расходу топлива на ~19%.

с контролем (20 см и 8 км/ч) в 2,2 ц/га (5,24%) является статистически значимой. Также значимой является разница в 1,3 ц/га (3,03%) между вариантами 3 и 4.

Выявленный оптимальный режим 3 (25 см и 8 км/ч) свидетельствует о том, что в условиях лесостепной зоны ЦЧР с ее периодически формирующимся уплотненным подпахотным горизонтом («плужной подошвой») и дефицитом влаги во второй половине лета углубленная обработка (25 см) оказывает положительный агротехнический эффект. Она способствует более глубокому рыхлению, разрушению уплотнений и увеличению влагозапасов в корнеобитаемом слое. Этот эффект перевешивает возросшие на 19% энергозатраты, что выражается в значимой прибавке урожая. Скорость 8 км/ч обеспечивает приемлемое качество крошения, которое напрямую влияет на полевую всхожесть семян и равномерность развития растений. Предлагаемый режим является компромиссным решением в системе «Энергозатраты – качество обработки – урожайность» (рис. 4).

Снижение скорости до 8 км/ч при глубокой обработке не минимизирует удельный расход топлива, но гарантирует высокое агротехническое качество, что в итоге обеспечивает максимальный хозяйственно-экономический результат.

2. Повышение рабочей скорости агрегата с 8 до 10 км/ч снижает удельный расход топлива на 7...9%, но вызывает статистически значимое ухудшение качества обработки почвы: глыбистость увеличивается на 1,0...1,5 балла; выравненность поверхности снижается в 1,5...1,7 раза.

3. Для условий лесостепной зоны ЦЧР на черноземе типичном экспериментально обоснован оптимальный режим работы комбинированного агрегата АКК-6 под яровую пшеницу: глубина обработки – 25 см при скорости движения 8 км/ч. Данный режим обеспечил максимальную урожайность 44,2 ц/га, что на 5,2% (2,2 ц/га) выше, чем при стандартной глубине 20 см и той же скорости.

4. Дисперсионный анализ подтвердил высокую значимость влияния изучаемых факторов (глубины,

скорости и их взаимодействия) на урожайность ($F = 103,71$; $p < 0,001$). Воспроизводимость результатов опыта является высокой ($CV < 1\%$).

5. Предпосевную обработку агрегатом АКК-6 рекомендуется проводить на глубину 24...26 см со скоростью 8...9 км/ч. Полученные данные могут быть использованы для уточнения нормативов расхода топлива и разработки регламентов эксплуатации комбинированных почвообрабатывающих агрегатов.

Список источников

1. Далисова Н.А., Степанова Э.В. Диверсификация сельскохозяйственного производства на основе ресурсосбережения // Вестник Алтайской академии экономики и права. 2018. № 6. С. 58-68. EDN: YUDTGP
2. Луконин Н.А., Воротников И.Л., Богатырёв С.А., Ерюшев М.В. Обоснование целесообразности разработки ресурсосберегающей технологии и создания комбинированного агрегата для полосовой обработки почвы // Аграрный научный журнал. 2020. № 11. С. 121-124. <https://doi.org/10.28983/asj.y2020i11pp121-124>. EDN: EFMZCR
3. Николаев А.Д., Тихоновский В.В., Блынский Ю.Н., Тихоновская К.В. Методика исследований по уплотнению почвы при выполнении технологических перевозок в период уборки урожая // 3i: Intellect, Idea, Innovation – интеллект, идея, инновация. 2022. № 3. С. 120-126. EDN: YUMMLA
4. Чернобрисов С.Ф., Димогло А.В., Михайлов В.С. Обоснование выбора оптимального состава комбинированного машинно-тракторного агрегата // Вестник Приднестровского университета. Серия «Физико-математические и технические науки. Экономика и управление». 2020. № 3 (66). С. 96-103. EDN: OSIRFH
5. Бойков В.М., Воротников И.Л., Старцев С.В., Башмаков И.А. Технологические направления снижения энергоемкости процесса основной обработки почвы // Аграрный научный журнал. 2019. № 11. С. 86-88. <https://doi.org/10.28983/asj.y2019i11pp86-88>. EDN: MOVCPW
6. Турусов В.И., Гармашов В.М. Минимализация основной обработки почвы в почвенно-климатических условиях Центрально-Черноземного региона // Сельскохозяйственный журнал. 2019. № 3 (12). С. 37-46. EDN: ПЕОКОТ
7. Милюткин В.А. Российские инновационные агрегаты «Туман» (опрыскиватель и мультинжектор) ООО «Пегас-Агро» для внесения жидких удобрений КАС // Вестник аграрной науки Дона. 2022. Т. 15, № 3 (59). С. 84-96. EDN: BXFBJP
8. Москвичев Д.А. Оптимизация диагностирования узлов и агрегатов тракторов Кировец К-742М с помощью программы ЭВМ на языке программирования Python // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 4. С. 54-60. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-4-54-60>
9. Москвичев Д.А., Виноградов О.В. Эффективность модернизации сельскохозяйственной техники путем использования модульного транспорта // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». 2018. № 2 (84). С. 33-36. <https://doi.org/10.26897/1728-7936-2018-2-33-36>
10. Деметьев Д.А., Фадеев А.А. Рентабельность обработки почвы под сельскохозяйственные культуры в севообороте при минимизации обработки почвы // Международный сельскохозяйственный журнал. 2021. № 6 (384). С. 46-49. EDN: TUIIFF

References

1. Dalisova N.A., Stepanova E.V. Diversification of agricultural production based on resource saving. *Vestnik Altaiskoy akademii ekonomiki i prava*, 2018;6:58-68. (In Russ.)
2. Lukonin N.A., Vorotnikov I.L., Bogatyrev S.A., Eryushev M.V. Justification for the development of resource-saving technology and the production of the combined unit for strip tillage. *The Agrarian Scientific Journal*. 2020;11:121-124. (In Russ.) <https://doi.org/10.28983/asj.y2020i11pp121-124>
3. Nikolaev A.D., Tihonovskij V.V., Blynskiy Yu.N., Tihonovskaya K.V. Methodology of research on soil compaction when performing technological transportation in the process of harvesting. *3i: Intellect, Idea, Innovation – Intellect, idei, innivatsii*. 2022;3:120-126. (In Russ.)
4. Chernobrisov S.F., Dimoglo A.V., Mihaylov V.S. Substantiation and choice of the optimal composition of the combined machine-tractor unit. *Vestnik Pridnestrovskogo universiteta. Series "Fiziko-matematicheskie i tekhnicheskie nauki. Ekonomika i upravleniye"*. 2020;3:96-103. (In Russ.)
5. Boykov V.M., Vorotnikov I.L., Startsev S.V., Bashmakov I.A. Technological directions of reducing the energy intensity of the primary tillage process. *The Agrarian Scientific Journal*. 2019;11:86-88. (In Russ.) <https://doi.org/10.28983/asj.y2019i11pp86-88>
6. Trusov V.I., Garmashov V.M. Minimization of primary tillage in the soil and climatic conditions of the Central Black Earth Region. *Agricultural Journal*. 2019;3:37-46. (In Russ.)
7. Milyutkin V.A. Comparative efficiency of innovative units "Tuman" (sprayer and multi-injector) LLC "Pegas-Agro" when applying liquid fertilizers cam. *Don Agrarian Science Bulletin*. 2022;15(3):84-96. (In Russ.)
8. Moskvichev D.A. Optimization of diagnostics of units and assemblies of Kirovets K-742M tractors using software in the Python programming language. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(4):54-60 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-4-54-60>
9. Moskvichev D.A., Vinogradov O.V. Efficiency of agricultural machinery modernization by means of modular transport. *Vestnik of Federal State Educational Establishment of Higher Professional Education "Moscow State Agroengineering University Named After V.P. Goryachkin"*. 2018;2:33-36. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1728-7936-2018-2-33-36>
10. Demytyev D.A., Fadeev A.A. Profitability of tillage for agricultural crops in crop rotation while minimizing tillage. *Mezhdunarodnyi Sel'skokhozyaistvennyi Zhurnal*. 2021;6:46-49. (In Russ.)
11. Kravchenko R.V., Terekhova S.S., Grechishchev D.S. Influence of basic soil treatment on agrophysical indicators of soil under winter wheat crops. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2022;176:96-107. (In Russ.)

11. Кравченко Р.В., Терехова С.С., Гречищев Д.С. Влияние основной обработки почвы на агрофизические показатели почвы под посевами озимой пшеницы // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2022. № 176. С. 96-107. EDN: TGBSML

12. Горохов М.М., Саетова Л.Г. Факторный анализ данных // Социально-экономическое управление: теория и практика. 2020. № 4 (43). С. 65-69. EDN: AXDQYR

13. Vinogradov O.V., Moskvichev D.A., Didmanidze O.N., Parlyuk E.P. Methods of analyzing the structure of the modular car park and the intensity of its operation. *Indo American Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2019;6(3):5289-5292. <https://doi.org/10.5281/zenodo.2592821>

14. Evgrafov A., Guzalov A., Moskvichev D. Experimental studies of temperature-dynamic properties of peat soils in agricultural lands. *E3S Web of Conferences: XI International Conference on Advanced Agritechnologies, Environmental Engineering and Sustainable Development, Termez, Uzbekistan*. Termez, Uzbekistan: EDP Sciences, 2025. P. 5003. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202561305003>

Информация об авторах

¹ **Москвичев Дмитрий Александрович**, канд. техн. наук, доцент кафедры тракторов и автомобилей; moskvichev@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0009-0002-7082-4876>; SPIN-код: 3787-0273

² **Евграфов Алексей Владимирович**, д-р техн. наук, доцент кафедры тракторов и автомобилей; av.evgrafov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2313-2191>, SPIN-код: 3758-0885

³ **Гузалов Артёмбек Сергеевич**, канд. техн. наук, доцент кафедры тракторов и автомобилей; guzalov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3526-4332>; SPIN-код: 1552-5321

⁴ **Митягин Григорий Евгеньевич**, канд. техн. наук, доцент кафедры тракторов и автомобилей; mityagin@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2667-9309>; SPIN-код: 8420-7615

⁵ **Андреев Олег Петрович**, канд. техн. наук, доцент кафедры тракторов и автомобилей; aopmsau@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0738-302X>; SPIN-код: 2036-7435

^{1, 2, 3, 4, 5} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; Россия; 127434, г. Москва, Тимирязевская ул., 49

Вклад авторов

Москвичев Д.А. – методология, руководство исследованиями; Евграфов А.В. – концептуализация, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование; Гузалов А.С. – создание черновика рукописи; Митягин Г.Е. – ресурсы, визуализация.

Андреев О.П. – проведение исследования; верификация данных.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 22.01.2026, после рецензирования и доработки 08.04.2026, принята к публикации 14.05.2026

12. Gorokhov M.M., Saetova L.G. Factor data analysis. *Social'no-e'konomicheskoe upravlenie: Teoriya i praktika*. 2020;4:65-69. (In Russ.)

13. Vinogradov O.V., Moskvichev D.A., Didmanidze O.N., Parlyuk E.P. Methods of analyzing the structure of the modular car park and the intensity of its operation. *Indo American Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2019;6(3):5289-5292. <https://doi.org/10.5281/zenodo.2592821>

14. Evgrafov A., Guzalov A., Moskvichev D. Experimental studies of temperature-dynamic properties of peat soils in agricultural lands. *E3S Web of Conferences: XI International Conference on Advanced Agritechnologies, Environmental Engineering and Sustainable Development*. Termez, Uzbekistan: EDP Sciences, 2025. P. 5003. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202561305003>

Author Information

Dmitry A. Moskvichev¹, CSc (Eng), Associate Professor, the Department of Tractors and Automobiles, moskvichev@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0009-0002-7082-4876>; Scopus Author ID: 59647875700

Alexey V. Evgrafov², DSc (Eng), Associate Professor, the Department of Tractors and Automobiles, av.evgrafov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2313-2191>

Artembek S. Guzalov³, CSc (Eng), Associate Professor, the Department of Tractors and Automobiles; guzalov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3526-4332>, Scopus Author ID: 58072433200

Grigory E. Mityagin⁴, CSc (Eng), Associate Professor, the Department of Tractors and Automobiles; mityagin@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2667-9309>

Oleg P. Andreev⁵, CSc (Eng), Associate Professor, of the Department of Tractors and Automobiles; aopmsau@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0738-302X>

^{1, 2, 3, 4, 5} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 127434, Russian Federation, Moscow, Timiryazevskaya Str., 49

Author Contribution

D.A. Moskvichev – methodology, research supervision; A.V. Evgrafov – conceptualization, writing – manuscript review and editing;

A.S. Guzalov – writing – original draft; G.E. Mityagin – resources, visualization; O.P. Andreev – investigation, data verification.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest and are responsible for plagiarism

Received 22.01.2026; Revised 08.04.2026; Accepted 14.05.2026

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.372:631.95

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-3-65-73>

Перспективные направления и прогноз применения альтернативной энергетики в сельскохозяйственных тракторах

И.А. Старостин^{1✉}, А.В. Ещин², С.А. Давыдова³^{1,2,3} Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия¹ starwan@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8890-1107>² eschin-vim@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9368-7758>³ davidova-sa@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1219-3335>

Аннотация. В условиях необходимости снижения уровня выбросов парниковых газов актуальны исследования по выявлению перспективных концептуальных направлений применения альтернативных видов топлива, накопителей и источников энергии в энергетических установках сельскохозяйственных мобильных средств. Анализ публикаций, патентов и экспертных мнений позволил составить долгосрочный прогноз применения альтернативной энергетики в сельскохозяйственных тракторах. При прогнозировании моделировали два сценария развития: базовый и стагнационный. Базовый сценарий предусматривал реализацию планов по полному исключению выбросов парниковых газов в атмосферу, а стагнационный допускал дальнейшее применение преимущественно традиционных источников энергии. По двум сценариям рассчитаны стоимости энергоносителей, накопителей и основных компонентов для применения альтернативной энергии в тракторах на период 2024-2050 гг. С учетом полученных значений рассчитана прогнозная себестоимость моточаса эксплуатации тракторов тяговых классов 1,4; 3 и 5 на дизельном топливе, рапсовом масле, сжатом природном газе, аккумуляторных батареях и водородных топливных элементах на период до 2050 г. Установлено, что в ближайшем будущем экономически целесообразным может стать использование сельскохозяйственных тракторов тяговых классов 1,4; 3 и 5 с двигателями внутреннего сгорания на газомоторном топливе при условии решения проблем размещения газобаллонного оборудования на борту трактора. Перспективными являются исследования, нацеленные на повышение КПД двигателей внутреннего сгорания и снижение выбросов вредных веществ, развитие инфраструктуры передачи и хранения газомоторного топлива на предприятиях. Кроме того, высокий потенциал применения имеют электрические тракторы, и востребованы исследования по созданию электрических трансмиссий с учетом режимов работы техники, совершенствованию накопителей электрической энергии, систем преобразования и управления, созданию инфраструктуры по их зарядке. Также будут интересны исследования по модернизации систем питания двигателей для работы на чистом биотопливе и очистки выхлопных газов от оксидов азота.

Ключевые слова: трактор; стоимость энергоносителей; себестоимость моточаса; топливо; газ; водород; биотопливо; биодизельное топливо; аккумулятор; прогноз применения альтернативной энергетики

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России FGUN-2025-0002.

Для цитирования: Старостин И.А., Ещин А.В., Давыдова С.А. Перспективные направления и прогноз применения альтернативной энергетики в сельскохозяйственных тракторах // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 3. С. 65-73. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-3-65-73>

ORIGINAL ARTICLE

Promising trends and prospects for the use of alternative energy in agricultural tractors

I.A. Starostin¹✉, A.V. Eshchin², S.A. Davydova³

^{1,2,3} Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Moscow, Russia

¹ starwan@yandex.ru✉; <https://orcid.org/0000-0002-8890-1107>

² eschin-vim@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9368-7758>

³ davidova-sa@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1219-3335>

Abstract. The urgent need to reduce greenhouse gas emissions necessitates research into promising conceptual trends in alternative fuels, energy storage systems, and power sources for agricultural mobile machinery. This study presents a long-term forecast for the adoption of alternative energy in agricultural tractors, developed through an analysis of publications, patents, and expert opinions. Two development scenarios were modeled: a baseline scenario, which assumes the full elimination of greenhouse gas emissions in accordance with current policy targets, and a stagnation scenario, which envisions the continued predominance of conventional energy sources. For both scenarios, the costs of energy carriers, storage systems, and key components for alternative energy applications in tractors were estimated for the period from 2024 to 2050. Based on these estimates, the projected cost per motor-hour was calculated for tractors of traction classes 1.4, 3, and 5, operating on diesel fuel, rapeseed oil, compressed natural gas, battery electric systems, and hydrogen fuel cells. The findings indicate that, in the near future, the use of agricultural tractors of traction classes 1.4, 3, and 5 powered by natural gas-fueled internal combustion engines may become economically viable, provided that the challenges associated with integrating gas cylinder equipment onboard the tractor are effectively addressed. Promising research areas include enhancing the efficiency of internal combustion engines, reducing pollutant emissions, and developing infrastructure for the transfer and storage of natural gas at agricultural enterprises. Electric tractors also offer considerable application potential. Further research is needed to develop electric transmissions tailored to specific machinery operating modes, improve energy storage systems, advance power conversion and control technologies, and establish charging infrastructure. Additionally, research on upgrading engine fuel systems for operation on pure biofuels and on exhaust gas aftertreatment for nitrogen oxide reduction remains highly relevant.

Keywords: tractor; energy carrier cost; motor-hour cost; fuel; gas; hydrogen; biofuel; biodiesel; battery; forecast of alternative energy use

Funding. The research was carried out within the framework of the State assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project No. FGUN-2025-0002).

For citation: Starostin I.A., Eshchin A.V., Davydova S.A. Promising trends and prospects for the use of alternative energy in agricultural tractors. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(3):65-73. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-3-65-73>

Введение

В соответствии со Стратегией социально-экономического развития России с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г.¹ выбросы парниковых газов к 2050 г. должны быть сокращены на 60% от уровня 2019 г. и на 80% от уровня 1990 г. При этом к 2060 г. возможно достижение углеродной нейтральности экономики, предполагающей равенство производства и поглощения CO₂. В соответствии с перечнем поручений по реализации Послания Президента Российской Федерации Федеральному Со-

бранию Российской Федерации от 29 февраля 2024 г. необходимо обеспечить поэтапное сокращение выбросов опасных загрязняющих веществ к 2036 г. в 2 раза. Принимая во внимание поставленные цели, необходимо определить приоритетные направления развития отечественных сельскохозяйственных мобильных средств с учетом снижения их негативного воздействия на окружающую среду и повышения экономической эффективности сельскохозяйственного производства.

Цель исследований: выявление перспективных концептуальных направлений применения альтернативных видов топлива, накопителей и источников энергии в энергетических установках мобильных средств сельскохозяйственного назначения путем

¹ Стратегия социально-экономического развития России с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г.: утв. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 1 ноября 2021 г. № 3052-п. URL: <https://base.garant.ru/402994476/>.

анализа тенденций развития и экономической оценки использования сельскохозяйственных тракторов с применением альтернативных источников энергии в долгосрочной перспективе.

Материалы и методы

В качестве перспективных вариантов альтернативных видов топлива, накопителей и источников энергии рассматривали биодизельное топливо (рапсовое масло – РМ) [1-3], сжатый природный газ (КПГ) [4-6], электропривод с питанием от аккумуляторных батарей (АКБ) [7-9] и водородных топливных элементов (ВТЭ) [10, 11].

Прогностическая оценка перспектив использования альтернативных источников энергии в мобильных средствах сельскохозяйственного назначения до 2050 г. выполнена на основе расчета экономической эффективности использования альтернативных видов топлива, накопителей и источников энергии с учетом текущего и прогнозных значений их стоимости в 2030, 2040 и 2050 гг. [12]. При оценке учитывали затраты на энергоноситель (дизельное топливо (ДТ), РМ, КПГ, электрическую энергию (ЭЭ) и водород (H_2)), затраты на амортизацию, техническое обслуживание и ремонт трактора с учетом годовой загрузки, затраты на оплату труда оператора.

В качестве базового варианта рассматривали использование дизельного топлива. Расчеты осуществляли в ценах и по курсу валют 2024 г. без учета инфляции, то есть предполагали, что соотношение стоимостей за рассматриваемые периоды не изменится. Затраты, связанные с формированием, эксплуатацией и обслуживанием соответствующей инфраструктуры, не учитывали.

Расчет прогнозной себестоимости эксплуатации сельскохозяйственных тракторов при использовании в них альтернативных видов топлива, накопителей и источников энергии произведен на основе анализа научных публикаций, размещенных в системе elibrary, патентов, зарегистрированных в Международной патентной системе (РСТ) и Всемирной организации интеллектуальной собственности (WIPO), и опроса экспертов в области использования альтернативных источников энергии в сельскохозяйственной мобильной энергетике.

Себестоимость моточаса эксплуатации подразумевает совокупные затраты на выполнение работ мобильным средством при номинальной загрузке энергетической установки в течение одного часа.

Результаты и их обсуждение

В процессе изучения публикаций, посвященных использованию смесового топлива, развитию

технологий применения электропривода и источников питания в мобильных средствах сельскохозяйственного назначения [13], выявлены факторы, сдерживающие использование альтернативных видов топлива. Например, в случае применения газомоторного топлива необходимы конструктивная адаптация или переоборудование энергосредств – в частности, установка газобаллонного оборудования [14, 15]. К тому же отсутствие развитой инфраструктуры обслуживания и заправки ограничивает возможности эксплуатации энергосредств на альтернативных видах топлива, что снижает их потребительскую привлекательность [14].

Анализ патентов выявил тенденцию снижения интереса научного сообщества к разработке и совершенствованию двигателей внутреннего сгорания, в том числе работающих на различных видах топлива. При этом отмечается рост интереса к электрическому приводу и применению различных видов накопителей электрической энергии.

Проведенный онлайн-опрос экспертов в области применения альтернативных источников энергии в сельскохозяйственной мобильной энергетике показывает, что респонденты считают наиболее перспективными технологии применения в сельскохозяйственной технике двигателей внутреннего сгорания, работающих на газомоторном топливе, гибридных энергетических установок с механической трансмиссией и накопителями энергии в виде аккумуляторных батарей, двигателей внутреннего сгорания, работающих на биотопливе.

При построении прогноза развития энергетического обеспечения мобильных средств до 2050 г. моделировали два сценария развития: базовый и стагнационный.

Базовый сценарий предполагает, что до 2050 г. сохранится курс большинства развитых стран по полному исключению выбросов парниковых газов в атмосферу (декарбонизация экономики) и, в частности, по запрету транспорта с двигателями внутреннего сгорания. В России и в развивающихся странах сохранится тенденция снижения выбросов парниковых газов. При этом будет допускаться эксплуатация транспорта и других мобильных средств с двигателями внутреннего сгорания. Россия будет развивать безопасную атомную энергетику и альтернативные источники генерации электрической энергии.

Согласно базовому сценарию в долгосрочной перспективе в России, во-первых, будет снижено потребление дизельного топлива. Предполагается, что стоимость дизельного топлива будет повышаться на фоне роста заложенных в его стоимости издержек по содержанию его производства, инфраструктуры

хранения, транспортировки и заправки, а также под влиянием роста себестоимости добычи нефти. Во-вторых, планируется увеличение производства и потребления биодизеля на основе рапсового масла с незначительным ростом стоимости в долгосрочной перспективе. При работе двигателей на биодизельном топливе в атмосферу выделяется CO_2 , который ранее был поглощен растениями из атмосферы. В результате образуется замкнутый цикл без внесения в атмосферу углерода из ископаемых соединений углеводородов. В России есть потенциал увеличения производства и широкого распространения в долгосрочной перспективе биодизельного топлива [4, 5]. В-третьих, будут поддерживаться научные исследования и разработки в области повышения эффективности источников и накопителей энергии [16]. В-четвертых, продолжится технологическое совершенствование существующих технологий для генерации и хранения электрической энергии. В-пятых, планируется расширенное производство и массовое распространение ветрогенераторов и солнечных панелей, накопителей энергии (в частности, Li-ion аккумуляторных батарей) [17], водородных топливных элементов, технологий хранения водорода, систем автоматизированного электропривода для транспорта. В-шестых, сохранится тенденция дальнейшего развития электрической и газовой инфраструктуры снабжения промышленных объектов и населенных пунктов. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 29 августа 2025 г. № 2366-р утверждена Концепция развития рынка газомоторного топлива в Российской Федерации на период до 2035 года, базовый сценарий которой предусматривает рост объема потребления газомоторного топлива техникой и оборудованием для сельского хозяйства до 0,17 млрд куб. м к 2035 г. В-седьмых,

будет активно развиваться инфраструктура газозаправочных станций, зарядных станций и водородных заправок. Производить «голубой водород» для экспорта и внутреннего потребления будут преимущественно с помощью методов парового риформинга с улавливанием диоксида углерода и электролиза.

На основании базового сценария рассчитаны значения стоимости энергоносителей и накопителей энергии для сельскохозяйственных мобильных средств в России на период 2024-2050 гг. (рис. 1).

Стагнационный сценарий развития энергетического обеспечения мобильных средств предполагает, что до 2050 г. в большинстве стран будут пересмотрены планы по полному исключению выбросов парниковых газов транспортными средствами. В частности, в России сохранится использование традиционных источников энергии на фоне роста генерации электрической энергии, в том числе от ветряков и солнечных панелей, атомных и гидроэлектростанций. Согласно стагнационному сценарию в долгосрочной перспективе, во-первых, стоимость дизельного топлива будет повышаться при сохранении ее объемов и повышения себестоимости добычи нефти. Во-вторых, планируется рост потребления природного газа и электрической энергии как промышленностью, так и транспортом. Предполагаются дальнейшее обновление и развитие электрической и газовой инфраструктуры снабжения промышленных объектов и населенных пунктов, создание инфраструктуры газозаправочных станций в крупных городах и на автомагистралях. Стоимость электрической энергии и природного газа на фоне роста их потребления в условиях развития и модернизации существующей инфраструктуры будет повышаться. В-третьих, возможны постепенное формирование

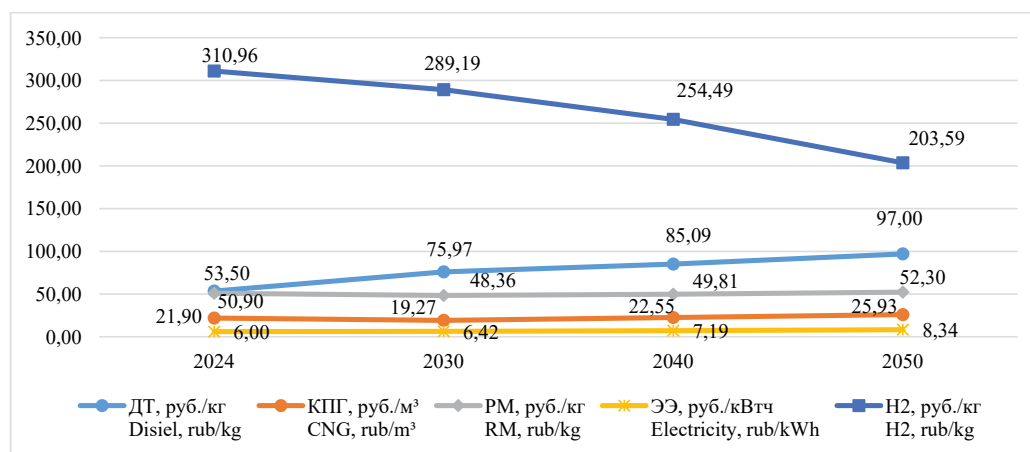


Рис. 1. Прогнозная стоимость энергоносителей и накопителей энергии в России до 2050 г. согласно базовому сценарию

Fig. 1. Projected cost of energy carriers and energy storage units in Russia until 2050 according to the baseline scenario

локальных производств и рост потребления водорода. Однако водородные заправки могут получить распространение только в крупных городах и на соединяющих их основных автомагистралях. Стоимость водорода на фоне медленного развития его генерации и высоких затрат на производство, хранение и транспортировку будет снижаться низкими темпами. В-четвертых, будет продолжено развитие атомной энергетики и альтернативных источников генерации электрической энергии с подачей в общую сеть, при этом ее стоимость будет повышаться на фоне роста общего потребления. В-пятых, биодизельное топливо не получит широкого распространения, поскольку требует для своего производства существенных площадей пашни, которые будут все больше востребованы для производства сельскохозяйственной продукции. В-шестых, предполагается сохранение существующего уровня поддержки научных исследований и разработок в области повышения эффективности источников, накопителей и преобразователей энергии, а также автоматизированного электропривода. При этом серийно применяемые технологии и ключевая компонентная база преимущественно будут импортными, вследствие чего их стоимость будет снижаться низкими темпами.

На основании стагнационного сценария развития предложены оценочные значения стоимости энергоносителей и накопителей для сельскохозяйственных мобильных энергетических средств в России на период 2024-2050 гг. (рис. 2).

Прогнозная оценка экономической эффективности мобильных энергетических средств на различных альтернативных источниках энергии осуществлена путем сравнения стоимости моточаса их эксплуатации по базовому и стагнационному сценариям.

Результаты прогнозных значений себестоимости эксплуатации мобильных энергетических средств на альтернативных источниках энергии до 2050 г. по базовому и стагнационному сценариям представлены на рисунке 3. В качестве примера приведены графики себестоимости (руб.) одного моточаса эксплуатации тракторов тяговых классов 1,4; 3 и 5 на дизельном топливе (ДТ), биотопливе (РМ), компримированном природном газе (КПГ), аккумуляторных батареях (АКБ) и водородных топливных элементах (ВТЭ) с обеспечением запаса энергоносителей или электрической энергии для возможности непрерывной работы в течение 8 часов.

Нижние ветви графиков рисунка 3 соответствуют базовому сценарию, а верхние – стагнационному. Области между верхними и нижними ветвями отражают диапазон прогнозируемых значений себестоимости эксплуатации тракторов при использовании рассматриваемых энергоносителей и накопителей энергии.

Полученные графики себестоимости эксплуатации тракторов показывают, что паритет по себестоимости между применением рапсового масла и дизельного топлива может быть достигнут в ближайшие 2-3 года, и в дальнейшем применение рапсового масла может стать экономически оправданным.

Паритет по себестоимости между применением компримированного природного газа и дизельного топлива может быть достигнут уже в настоящее время при условии решения технологических проблем, связанных с использованием компримированного природного газа и созданием доступной инфраструктуры.

Паритет по себестоимости между электрическими тракторами на аккумуляторных батареях и тракторами с двигателями внутреннего сгорания на дизельном

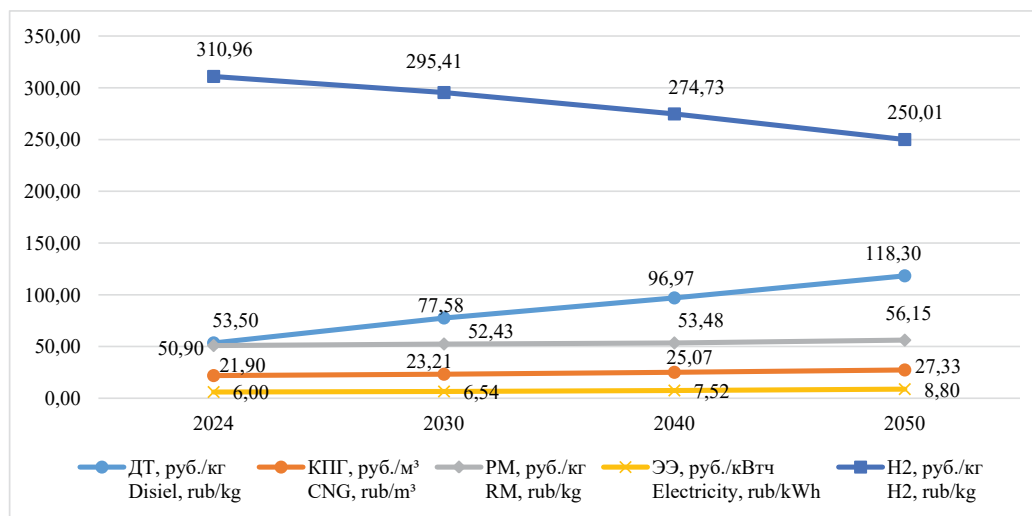


Рис. 2. Прогнозная стоимость энергоносителей в России до 2050 г. согласно стагнационному сценарию

Fig. 2. Projected cost of energy resources in Russia until 2050 according to the stagnation scenario

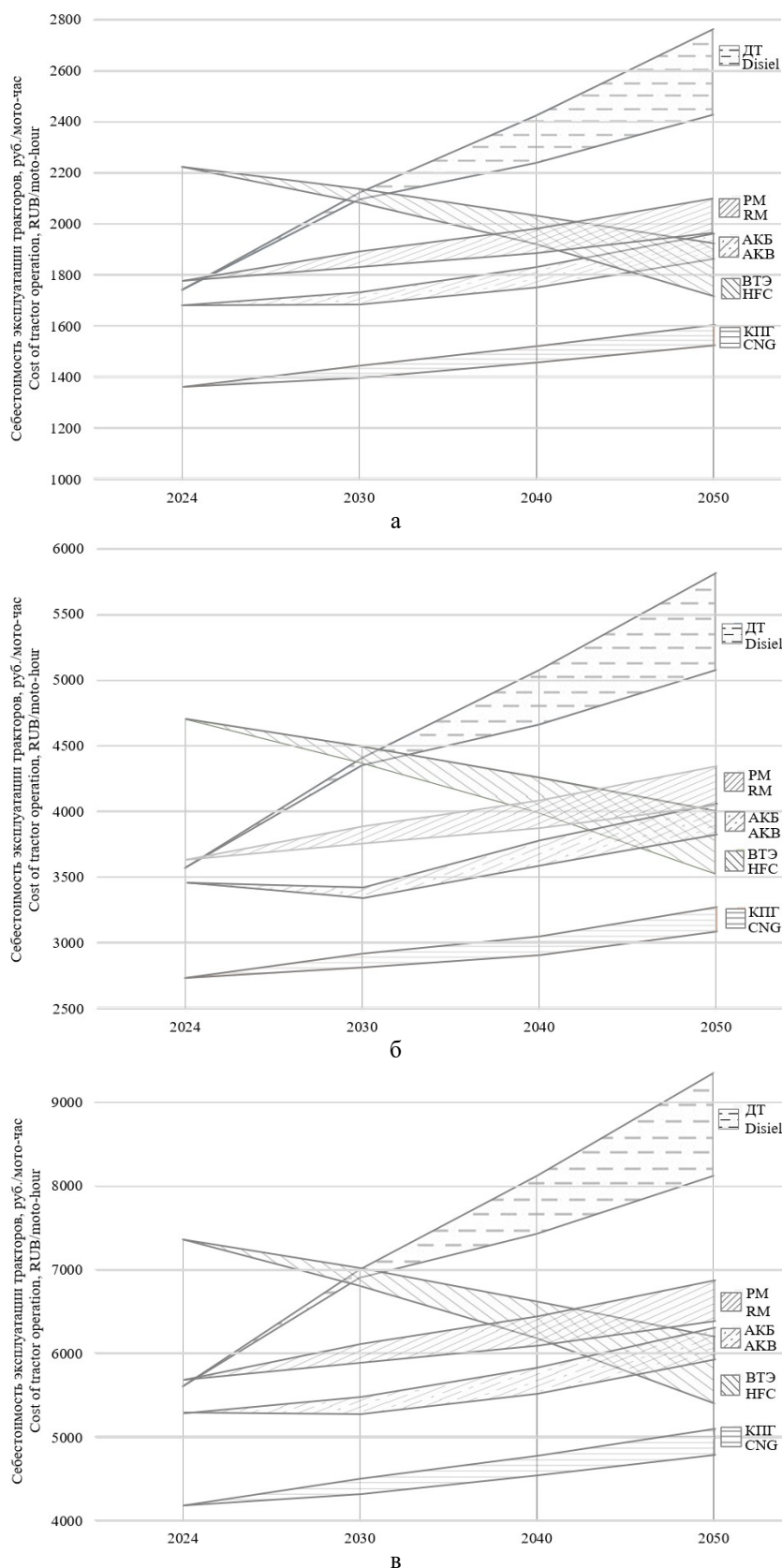


Рис. 3. Прогнозная себестоимость моточаса эксплуатации тракторов на дизельном топливе (ДТ), рапсовом масле (РМ), сжатом природном газе (КПГ), аккумуляторных батареях (АБ) и водородных топливных элементах (ВТЭ) на период до 2050 г.:

а – тяговый класс 1,4; б – тяговый класс 3; в – тяговый класс 5

Fig. 3. Estimated motor-hour cost for tractors powered by diesel fuel, rapeseed oil, compressed natural gas, rechargeable batteries and hydrogen fuel cells for the period up to 2050:

a – traction class 1.4; б – traction class 3; в – traction class 5

топливе может быть достигнут уже в настоящее время, и в дальнейшем использование электрических тракторов с аккумуляторными батареями может стать экономически более привлекательным [18, 19].

Паритет по себестоимости между электрическими тракторами на водородных топливных элементах и тракторами с двигателями внутреннего сгорания на дизельном топливе, возможно, будет достигнут к началу – середине 2030-х гг.

Сравнение расчетных значений себестоимости эксплуатации тракторов с применением рапсового масла и электрических тракторов на аккумуляторных батареях показывает, что применение электрических тракторов на аккумуляторных батареях является экономически более предпочтительным.

Сравнение расчетных значений себестоимости эксплуатации тракторов с применением рапсового масла и электрических тракторов на водородных топливных элементах показывает, что использование тракторов с двигателями внутреннего сгорания на рапсовом масле может быть экономически целесообразным до середины 2030 – середины 2040-х гг.

Паритет по себестоимости между электрическими тракторами на аккумуляторных батареях и водородных топливных элементах, возможно, будет достигнут в период с середины 2040-х гг. до 2050 г. При этом существует вероятность того, до 2050 г. паритет может быть не достигнут.

Анализ прогностической оценки показывает, что при необходимости обеспечения непрерывной работы в течение 8 часов экономически приемлемо и технологически допустимо использование тракторов с двигателями внутреннего сгорания на сжатом природном газе и электрических тракторов с аккумуляторными батареями [20]. При необходимости обеспечения непрерывной работы в течение продолжительного времени возможно использование тракторов с двигателями внутреннего сгорания на альтернативном биотопливе в виде рапсового масла. Применение электрических тракторов на водородных топливных элементах в ближайшие 10-15 лет является маловероятным в связи с их низкой экономической эффективностью, технологическими сложностями, необходимостью создания сложной инфраструктуры.

Список источников

1. Нагорнов С.А., Зазуля А.Н., Голубев И.Г., Болотина М.Н. Мировые тенденции в области использования биодизельного топлива // Техника и оборудование для села. 2023. № 10 (316). С. 2-5. EDN: XJAPQS
2. Овчинников Е.В., Уютов С.Ю., Лавров А.В., Дмитриев К.С. Экономическая оценка экологических показателей трактора, работающего на рапсовом масле // Экология

Выводы

1. В долгосрочной перспективе экономически целесообразно использовать трактора тяговых классов 1,4; 3 и 5 с двигателями внутреннего сгорания на газомоторном топливе при условии решения проблем размещения газобаллонного оборудования на борту трактора. В случае необходимости полного исключения выбросов вредных веществ при эксплуатации мобильной техники возможно применение электрических тракторов на аккумуляторных батареях. Перспективными являются исследования, направленные на решение следующих проблем: повышение КПД двигателей внутреннего сгорания и снижение выбросов вредных веществ; снижение материалоемкости и стоимости систем хранения газомоторного топлива на борту мобильных энергетических средств; разработка технологий повышения объемной плотности газомоторного топлива; развитие инфраструктуры передачи газомоторного топлива и систем распределенного хранения на предприятиях.

2. Электрические мобильные средства могут получить распространение в первую очередь на животноводческих фермах, в тепличных комплексах и в складском хозяйстве. Перспективными являются исследования, нацеленные на создание электрических трансмиссий с учетом режимов работы и условий эксплуатации сельскохозяйственной техники, совершенствование накопителей электрической энергии, систем преобразования и управления в направлении повышения эффективности и снижения стоимости, а также на разработку соответствующих решений инфраструктуры по их зарядке.

3. Трактора с двигателями внутреннего сгорания на альтернативном биотопливе имеют высокие перспективы развития, поскольку это требует несущественной модернизации выпускающихся двигателей внутреннего сгорания. При этом сохраняется возможность использования существующей инфраструктуры хозяйств для транспортировки и хранения дизельного топлива. Актуальными в данном направлении являются исследования по модернизации систем питания двигателей внутреннего сгорания, в том числе для работы на биотопливе в чистом виде, и очистке выхлопных газов – в частности, от образующихся при сгорании оксидов азота.

References

1. Nagornov S.A., Zazulya A.N., Golubev I.G., Bolotina M.N. Global trends in the use of biodiesel fuel. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2023;10:2-5. (In Russ.)
2. Ovchinnikov E.V., Uyutov S.Yu., Uyutov A.V. et al. Economic assessment of environmental performance of a tractor powered by rapeseed oil. *Industrial Ecology*. 2022;4:20-25. (In Russ.)

промышленного производства. 2022. № 4 (120). С. 20-25. EDN: DIUHWY

3. Лиханов В.А., Лопатин О.П. Применение рапсового масла и этанола в дизельном двигателе // Инженерные технологии и системы. 2022. Т. 32, № 3. С. 373-389. EDN: UNPSWX

4. Богачек О.Е., Гинзбург Ю.В., Садыков Я.Р. О новой технике использования КПП на транспорте и для мелких стационарных потребителей // Транспорт на альтернативном топливе. 2021. № S1. С. 25-30. EDN: JMVHNO

5. Коваленко В.П., Десянин С.Н., Улюкина Е.А., Тодорив А.В. Перспективы эксплуатации сельскохозяйственной техники на сжатом природном газе // Автогазозаправочный комплекс + Альтернативное топливо. 2017. Т. 16, № 7. С. 313-315. EDN: ZFRKMZ

6. Захарин А.В., Лебедев П.А., Павлюк Р.В. и др. Расчет целесообразности и эффективности перевода дизельных энергоносителей в газодизельный режим работы // Технический сервис машин. 2023. № 1 (150). С. 57-66. EDN: WWBRYJ

7. Бижаев А.В. Исследование параметров трактора с электроприводом силовым агрегатом // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2020. Т. 14, № 4. С. 33-42. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2020-14-4-33-42>

8. Лачуга Ю.Ф., Стребков Д.С., Годжаев З.А., Редько И.Я. Электрификация сельскохозяйственных мобильных энергоносителей на основе тягово-энергетической концепции развития техники // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия «Инженерные исследования». 2020. Т. 21, № 4. С. 260-270. <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-4-260-270>

9. Раков В.А., Литвинов В.И. Анализ экономической эффективности применения гибридного и электрического двигателей в тракторах // Агрозоотехника. 2020. Т. 3, № 3. С. 5. <https://doi.org/10.15838/alt.2020.3.3.5>

10. Федоткин Р.С., Овчинников Е.В., Крючков В.А., Дмитриев К.С. Обзор современных систем подачи топливной смеси на основе водорода в автотракторные двигатели (обзор) // Экология промышленного производства. 2021. № 3 (115). С. 39-46. EDN: SCKNZH

11. Федотов А.В., Ковалев Д.А. Способы хранения и аккумуляирования водорода // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2021. Т. 68, № 3 (44). С. 78-85. EDN: PBQJMC

12. Жданов Д.А., Молдабаев К.Т. Тенденции повышения энергоэффективности: возможности возобновляемой и традиционной энергетики // Актуальные проблемы экономики и права. 2020. Т. 14, № 2. С. 249-265. <https://doi.org/10.21202/1993-047X.14.2020.2.249-265>

13. Чернышева А.В., Колобков Б.И., Середя В.А. и др. Исследование возможности применения альтернативных сырьевых источников в качестве энергоносителей для ДВС // Наука в центральной России. 2023. № 5 (65). С. 104-111. EDN: JQSDFU

14. Болотина М.Н., Нагорнов С.А., Зазуля А.Н. и др. Экологически чистые источники энергии для привода мобильной сельскохозяйственной техники: Аналитический обзор. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2023. 80 с. EDN: FQXCEM

15. Измайлов А.Ю., Дорохов А.С., Старостин И.А., Ещин А.В. Декарбонизация мобильных энергетических средств, используемых в сельскохозяйственном производстве // Агроинженерия. 2024. Т. 26, № 1. С. 4-10. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-1-4-10>

16. Шинкарев В.В., Юлусов К.С., Полуэктов Е.К., Манихин А.П. Современные электрохимические накопители электроэнергии // Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности. 2023. Т. 8, № 11 (37). С. 96-109. EDN: HSDUNY

3. Likhonov V.A., Lopatin O.P. Usage of rape-seed oil and ethanol in a diesel engine. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(3):373-389. (In Russ.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202203.373-389>

4. Bogachek O.E., Ginzburg Yu.V., Sadykov Ya.R. New equipment for using CNG in transportation and SME (small and medium enterprises). *Alternative Fuel Transport*. 2021; S1:25-30. (In Russ.)

5. Kovalenko V.P., Devyanin S.N., Ulyukina E.A., Todoriv A.V. Prospects of operation of agricultural machinery on compressed natural gas. *Autogas Filling Complex+Alternative Fuel*. 2017;16 (7):313-315. (In Russ.)

6. Zakharin A.V., Lebedev P.A., Pavlyuk R.V. et al. Efficiency of conversion of diesel power means to gas-diesel operation mode. *Machinery Technical Service*. 2023;1:57-66. (In Russ.)

7. Bizhaev A.V. Research of tractor power unit with electric drive parameters. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2020;14(4):33-42. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2020-14-4-33-42>

8. Lachuga Yu.F., Strebkov D.S., Godzhaev Z.A., Redko I.Ya. Electrification of agricultural mobile power facilities based on the traction and energy concept of technology development. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2020;21(4):260-270. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-4-260-270>

9. Rakov V.A., Litvinov V.I. Economic value analysis of using hybrid and electric motors in tractors. *Agricultural and Livestock Technology*. 2020;3(3):5. (In Russ.) <https://doi.org/10.15838/alt.2020.3.3.5>

10. Fedotkin R.S., Ovchinnikov E.V., Kryuchkov V.A., Dmitriev K.S. Overview of modern systems for supplying a fuel mixture based on hydrogen in automotive engines (Review). *Industrial Ecology*. 2021;3:39-46. (In Russ.)

11. Fedotov A.V., Kovalev D.A. Methods of storage and accumulation of hydrogen. *Electrical Engineering and Electrical Equipment in Agriculture*. 2021;68(3):78-85. (In Russ.)

12. Zhdanov D.A., Moldabaev K.T. Trends of increasing energy efficiency: opportunities of renewable and traditional energy sectors. *Actual Problems of Economics and Law*. 2020;14(2):249-265. (In Russ.) <https://doi.org/10.21202/1993-047X.14.2020.2.249-265>

13. Chernysheva A., Kolobkov B., Sereda V., Kornev A., Liksutina A. Study of the possibility of using alternative raw material sources as energy carriers for internal combustion engines. *Science in the Central Russia*. 2023;5:104-111. (In Russ.)

14. Bolotina M.N., Nagornov S.A., Zazulya A.N. et al. Clean energy sources or driving mobile agricultural machinery. Moscow, FGBNU «Rosinformagrotekh», 2023. 80 p. (In Russ.)

15. Izmaylov A.Y., Dorokhov A.S., Starostin I.A., Eshchin A.V. Decarbonization of mobile energy vehicles used in agricultural production. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2024;26(1):4-10. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-1-4-10>

16. Shinkarev V.V., Yulusov K.S., Poluektov E.K., Manikhin A.P. Modern electrochemical power storage devices. *Mezhdunarodnyy zhurnal informatsionnykh tekhnologiy i energoeffektivnosti*. 2023;8(11):96-109. (In Russ.)

17. Katayev Yu.V., Gerasimov V.S., Baulin N.K. Technologies and features of disposal of lithium-ion batteries. *Machinery Technical Service*. 2022;1:32-38. (In Russ.)

18. Tsench Yu.S., Sharov V.V. Advancement of domestic mobile agricultural machinery powered by electric traction. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024;18(3):4-13. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2024-18-3-4-13>

19. Rtischeva N.E., Pulyaev N.N., Guzalov A.S. Electric tractor: design specifics and development prospects.

17. Катаев Ю.В., Герасимов В.С., Баулин Н.К. Технологии и особенности утилизации литий-ионных аккумуляторных батарей // Технический сервис машин. 2022. № 1 (146). С. 32-38. EDN: OERKFQ

18. Ценч Ю.С., Шаров В.В. Становление отечественной мобильной сельскохозяйственной техники на электротяге // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2024. Т. 18, № 3. С. 4-13. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2024-18-3-4-13>

19. Ртищева Н.Е., Пуляев Н.Н., Гузалов А.С. Электрический трактор: особенности конструкции и перспективы развития // Journal of Agriculture and Environment. 2022. № 8 (28). С. 15. <https://doi.org/10.23649/jae.2022.28.8.015>. EDN: WLGPRU

20. Юфев Л.Ю., Споров А.П., Гусаров В.А., Писарев Д.Ю. Тенденции развития сельскохозяйственной электрифицированной мобильной техники // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2022. Т. 69, № 1 (46). С. 3-8. EDN: SGJMPH

Информация об авторах

¹ Старостин Иван Александрович, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник; starwan@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8890-1107>; SPIN-код: 7301-6845

² Ещин Александр Вадимович, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник; eshchin-vim@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9368-7758>; SPIN-код: 7610-5793

³ Давыдова Светлана Александровна, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник; davidova-sa@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1219-3335>; SPIN-код: 1050-6034

^{1, 2, 3} Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5

Вклад авторов

И.А. Старостин – концептуализация, методология;
А.В. Ещин – проведение исследований, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;
С.А. Давыдова – визуализация, создание черновика рукописи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 17.02.2026, после рецензирования и доработки 17.06.2026; принята к публикации 18.06.2026

Journal of Agriculture and Environment. 2022;8:15. (In Russ.) <https://doi.org/10.23649/jae.2022.28.8.015>

20. Yuferev L.Yu., Sporov A.P., Gusarov V.A., Pisarev D.Yu. Trends in the development of agricultural electrified mobile equipment. *Electrical Engineering and Electrical Equipment in Agriculture*. 2022;69(1):3-8. (In Russ.)

Author Information

Ivan A. Starostin¹, CSc (Eng), Lead Research Engineer; starwan@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8890-1107>

Aleksandr V. Eshchin², CSc (Eng), Lead Research Engineer; eshchin-vim@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9368-7758>

Svetlana A. Davydova³, CSc (Eng), Lead Research Engineer; davidova-sa@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1219-3335>

^{1, 2, 3} Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 109428, Russia, Moscow, 1st Institutsky Proezd Str., 5

Author Contribution

I.A. Starostin – conceptualization, research methodology;
A.V. Eshchin – investigation, writing – review and editing of the manuscript;
S.A. Davydova – visualization, writing – original draft.

Conflict of interests

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

Received 17.02.2026, Revised 17.06.2026; Accepted 18.06.2026

ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕРВИС В АПК

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.793: 620.1

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-3-74-83>

Структура и состав медно-алюминиевых фрикционных покрытий для деталей машин

В.И. Балабанов¹, **Н.Н. Ивахненко²**, **В.Г. Борулько³**, **Д.В. Добряков⁴**, **А.И. Кругляк⁵**,
М.Ю. Бадекин⁶

^{1, 2, 3, 6} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия

⁴ Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса; М.О. г. Пушкино, Россия

⁵ Объединенный институт ядерных исследований; г. Дубна, Россия

¹ vbalabanov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6486-6485>

² ivakhnenko_nn@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7328-7634>

³ vborulko@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3221-3567>

⁴ dimasdobr@rambler.ru

⁵ kruglyakai@ya.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0773-9919>

⁶ korund2002@list.ru; <http://orcid.org/0000-0002-3911-5900>

Аннотация. Прогнозировать свойства фрикционного покрытия для деталей машин, полученного в результате термомеханических и диффузионных процессов, можно при установлении корреляции параметров морфологии, элементного распределения и условий синтеза покрытий. С целью установления взаимосвязи этих факторов исследованы структура и состав медно-алюминиевого покрытия, синтезированного методом *in situ* фрикционного натирания на стальных подложках. Морфология поверхности и поперечного сечения изучена с помощью сканирующей электронной микроскопии в режиме обратно рассеянных электронов. Для количественной характеристики сложной системы трещин выполнен фрактальный анализ методом равномерных сеток. Глубинное распределение элементов Cu, Al, O и толщина слоев определены методом спектроскопии резерфордского обратного рассеяния (RBS). Полученное медно-алюминиевое покрытие характеризуется выраженной многоуровневой структурой. Данные RBS подтвердили формирование многослойной системы, включающей в себя поверхностную оксидную пленку Al_2O_3 (~5...15 нм), слой, обогащенный алюминием с градиентом меди, переходную диффузионную зону и медную подложку. СЭМ-анализ выявил масштабно-инвариантную организацию дефектов: от мозаичной полигонизации (20...80 мкм) до ультрамелкозернистой субструктуры (0,5...2 мкм) – и наличие оксидных включений (50...200 нм). Фрактальная размерность трещиноватой сети $1,917 \pm 0,076$ свидетельствует о ее высокой степени самоподобия в диапазоне масштабов 10...300 мкм. Плотность дефектов на микроуровне достигает 45,7%. Трещинообразование обусловлено комбинированным действием термомеханических напряжений и хрупкости интерметаллидных фаз, возникающих в условиях активной междиффузии. Одновременно фрикционный нагрев активизирует поверхностное окисление. Раскрытие фундаментальной связи между параметрами фрикционного процесса, фрактальной природой дефектов и составом покрытий позволит целенаправленно задавать свойства биметаллическим системам.

Ключевые слова: фрактальный анализ; трещинообразование; медно-алюминиевое покрытие; СЭМ-анализ; структура; покрытие; фрикционное покрытие

Финансирование: Работа выполнена в рамках проекта по созданию и развитию инжинирингового центра РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (соглашение № 075-15-2025-543 от 16 июня 2025 г.).

Для цитирования: Балабанов В.И., Ивахненко Н.Н., Борулько В.Г., Добряков Д.В., Кругляк А.И., Бадекин М.Ю. Структура и состав медно-алюминиевых фрикционных покрытий // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 3. С. 74-83. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-3-74-83>

ORIGINAL ARTICLE

Structure and composition of copper-aluminum friction coatings

V.I. Balabanov¹, N.N. Ivakhnenko², V.G. Borulko³, D.V. Dobryakov⁴, A.I. Kruglyak⁵, M.Yu. Badekin⁶^{1,2,3,6} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia⁴ FGBNU “Rosinformagrotekh”; Moscow region, Pushkino, Russia⁵ Joint Institute for Nuclear Research; Dubna, Russia¹ vbalabanov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6486-6485>² ivakhnenko_nn@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7328-7634>³ vborulko@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3221-3567>⁴ dimasdobr@rambler.ru⁵ kruglyakai@ya.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0773-9919>⁶ korund2002@list.ru; <http://orcid.org/0000-0002-3911-5900>

Abstract. The properties of a friction coating for machine parts obtained through thermomechanical and diffusion processes can be predicted by establishing a correlation between morphology parameters, elemental distribution, and coating synthesis conditions. To investigate the relationship among these factors, the authors examined the structure and composition of a copper-aluminum coating synthesized by in situ friction cladding on steel substrates. Surface and cross-sectional morphology were studied using scanning electron microscopy (SEM) in backscattered electron mode. Fractal analysis employing the grid method was performed to quantitatively characterize the complex crack system. The depth distribution of Cu, Al, and O, as well as the layer thickness, were determined by Rutherford backscattering spectroscopy (RBS). The obtained copper-aluminum coating exhibits a pronounced multilevel structure. RBS data confirmed the formation of a multilayer system comprising a surface Al₂O₃ oxide film (~5-15 nm), an aluminum-enriched layer with a copper gradient, a transition diffusion zone, and a copper substrate. SEM analysis revealed scale-invariant defect organization, ranging from mosaic polygonization (20-80 μm) to an ultrafine-grained substructure (0.5-2 μm), along with the presence of oxide inclusions (50-200 nm). The fractal dimension of the crack network, measured at 1.917 ± 0.076 , indicates a high degree of self-similarity over a scale range of 10-300 μm. The defect density at the micro level reaches 45.7%. Crack formation arises from the combined effect of thermomechanical stresses and the brittleness of intermetallic phases generated under conditions of active interdiffusion. Concurrently, frictional heating activates surface oxidation. Elucidating the fundamental relationship between the parameters of the friction process, the fractal nature of defects, and the coating composition will enable the targeted tailoring of properties in bimetallic systems.

Keywords: fractal analysis; crack formation; copper-aluminum coating; SEM analysis; structure; coating; friction coating

Funding. This work was carried out within the framework of the project for the establishment and development of the Engineering Center of Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Agreement No. 075-15-2025-543 dated June 16, 2025).

For citation: Balabanov V.I., Ivakhnenko N.N., Borulko V.G., Dobryakov D.V., Kruglyak A.I., Badekin M.Yu. Structure and composition of copper-aluminum friction coatings. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(3):74-83. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-3-74-83>

Введение

Фрикционные методы нанесения покрытий – эффективная и ресурсосберегающая альтернатива традиционным технологиям – таким, как гальваника или газотермическое напыление [1]. Эти методы, основанные на диффузионных процессах, интенсивной пластической деформации и локальном нагреве в зоне контакта, позволяют формировать прочно сцепленные, плотные слои без применения сложного вакуумного оборудования. Особый интерес представляет создание биметаллических систем – таких,

как «Медь-алюминий», сочетающих высокие триботехнические и прочностные характеристики [2]. Однако формирование таких покрытий сопровождается сложными термомеханическими и диффузионными процессами, приводящими к возникновению специфических структурных особенностей: слоистости, развитой трещиноватости, формированию оксидных фаз и ультрамелкозернистой субструктуры.

Несмотря на значительный прогресс в применении фрикционных методов, детальные взаимосвязи параметров процесса, возникающей многоуровневой морфологии покрытия, его химического состава

и конечных эксплуатационных свойств остаются недостаточно изученными. В частности, требует системного количественного описания масштабно-инвариантная (фрактальная) природа дефектной структуры, определяющая механическую целостность и долговечность покрытия [3]. Традиционный качественный анализ микрофотографий часто оказывается недостаточным для прогнозирования поведения материала. Для углубленного понимания механизмов формирования и деградации фрикционных покрытий необходим комплексный подход, сочетающий высокоразрешающую визуализацию, точный элементный анализ и современные методы количественной обработки изображений – такие, как фрактальный анализ [4].

Цель исследований: комплексное изучение структуры и состава медно-алюминиевых покрытий, полученных методом фрикционного натирания, с установлением количественных корреляций между параметрами морфологии, элементным распределением и условиями синтеза.

Материалы и методы

Медно-алюминиевое покрытие для деталей машин получали методом *in situ* фрикционного натирания на модифицированном токарно-винторезном станке: вращающиеся цилиндрические подложки из стали 40 активировали медно-алюминиевой технологической средой, после чего к ним под заданным нормальным усилием прижимали инструмент из алюминиевого сплава. Механизированная поперечная подача обеспечивала равномерное покрытие; интенсивный пластический перенос сопровождался характерным свистящим звуком и приводил к формированию прочно сцепленного слоя [5]. Заготовки нарезали на диски толщиной 5 мм, очищали и сушили для последующего анализа.

Для морфологического исследования использовали сканирующий электронный микроскоп LEO-1430 VP (Carl Zeiss, Германия) в режиме высокого вакуума с ускоряющим напряжением 20 кВ и четырехквadrантным детектором обратно рассеянных электронов (4QBSD). Образцы фиксировали на электропроводящий скотч и напыляли платиной (~10...15 нм) в течение 130 с в аргонной атмосфере (0,1...0,2 мбар) для предотвращения зарядки. Рабочее расстояние варьировали от 14 до 30 мм, что позволяло исследовать рельеф с увеличением от 100× до 4010×, охватывая как макрзоны контакта, так и субмикронные структуры. Высокий атомный контраст между Cu и Al обеспечивал четкую визуализацию границ зерен, трещин и фазовых включений без травления [6].

Фрактальный анализ проводили по микрофотографиям с применением Python (библиотеки OpenCV,

scikit-image). Изображения конвертировали в градации серого, сглаживали фильтром Гаусса ($\sigma = 1$), выделяли дефекты методом Кэнни (пороги 30/100), замыкали разрывы морфологической операций и бинаризовали. Фрактальную размерность D_f определяли методом равномерных сеток: на бинарное изображение накладывали сетку с размером ячейки $\varepsilon = 2 \dots 128$ пикселей (в геометрической прогрессии), подсчитывали число занятых ячеек $N(\varepsilon)$ и строили зависимость $\ln N(\varepsilon)$ от $\ln(1/\varepsilon)$. Наклон линейной регрессии (коэффициент детерминации $R^2 > 0,98$) давал значение $D_f = 1,917 \pm 0,076$, подтверждая самоподобие трещин в диапазоне масштабов 10...300 мкм. Анизотропию оценивали через преобразование Хафа: параметр порядка $S = 0,513$ указывал на умеренную направленность трещин, обусловленную направлением фрикционного воздействия. Плотность дефектов достигала 45,7% [7].

Элементный состав и глубинные профили Cu, Al и O определяли методом спектрометрии резерфордского обратного рассеяния (RBS) на ускорительной установке ЭГ-5 в лаборатории Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ) (рис. 1). Ионы $^4\text{He}^+$ ускоряли до 2,0 МэВ, регистрировали рассеянные частицы полупроводниковым детектором (угол 165° , разрешение 16 кэВ) при вакууме 0,67 мПа. Моделирование спектров осуществляли в программе SIMNRA 6.03 с учетом различия масс ядер меди и алюминия, что обеспечивало четкое разделение пиков и позволяло количественно оценить толщину слоев (0,5...5,0 мкм), градиенты концентрации и степень

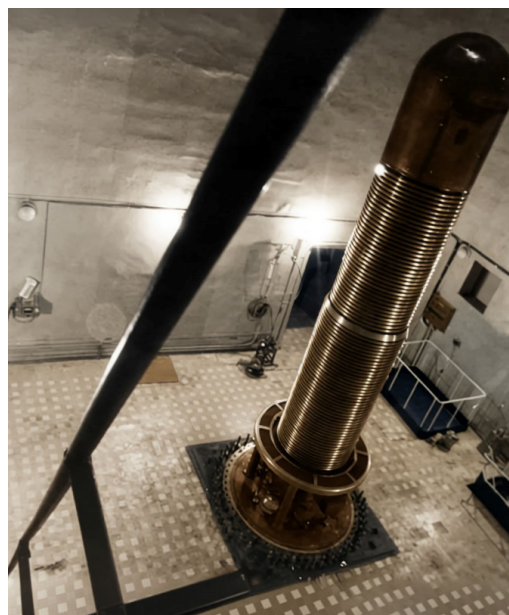


Рис. 1. Установка ЭГ-5 ОИЯИ. Общий вид камеры анализа с индукторной катушкой

Fig. 1. JINR EG-5 facility. General view of the analysis chamber with an induction coil

взаимной диффузии на границе «Покрытие-подложка» с погрешностью $\leq \pm 3\%$ (плотность потока $5 \cdot 10^{12}$ ионов/(с·см²), экспозиция 300 с) [8].

Результаты и их обсуждение

Исследование поверхности и глубинного состава медно-алюминиевых покрытий, полученных методом фрикционного наплавления, проводилось

комплексно: с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) в режиме обратно рассеянных электронов (QBSE) и спектроскопии резерфордского обратного рассеяния (RBS). Микрофотографии (рис. 2) с увеличением от $100 \times$ до $4010 \times$ обеспечили многоуровневое определение морфологии покрытия от макроскопических дефектов до субмикронных деталей поверхностной топологии [9].

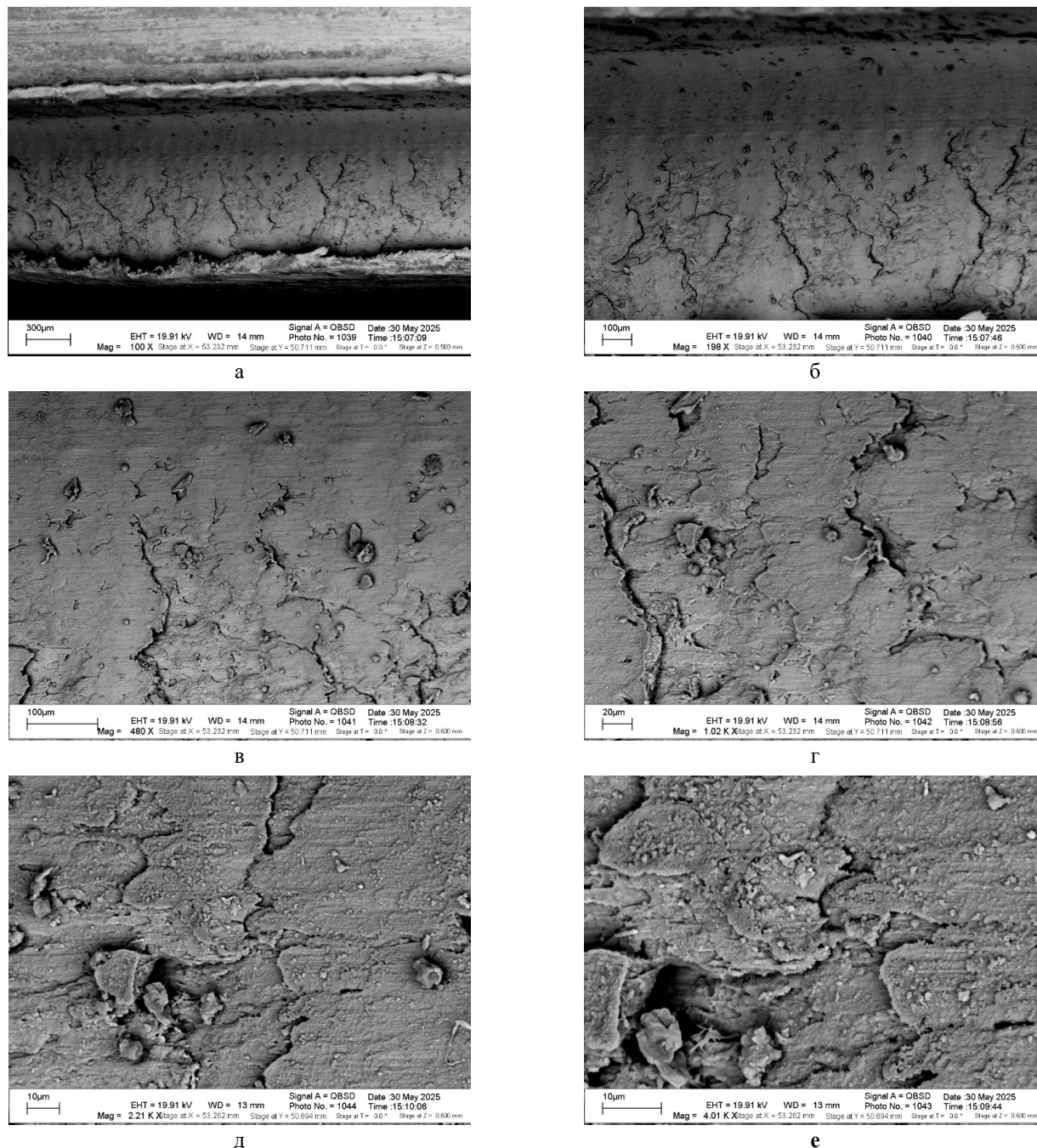


Рис. 2. СЭМ-изображения микроструктуры медно-алюминиевого покрытия, полученного фрикционным наплавлением. Поперечные срезы покрытия при различном увеличении: а) $\times 100$; б) $\times 198$; в) $\times 480$; г) $\times 1020$; д) $\times 2210$; е) $\times 4010$

Fig. 2. SEM images of the microstructure of copper-aluminum coatings obtained by friction cladding.

Cross sections of the coatings:

- a) magnification $\times 100$; б) magnification $\times 198$; в) magnification $\times 480$; д) magnification $\times 1020$; е) magnification $\times 2210$; е) magnification $\times 4010$

На начальном этапе микроскопического анализа при низком увеличении (рис. 2а) наблюдается характерная слоистая структура покрытия, формирующаяся в результате последовательного наложения и пластической деформации материала в зоне фрикционного контакта [10]. На рисунке можно увидеть поверхность с выраженной анизотропией, обусловленной направлением относительного движения инструмента и образца, проявляющейся в преимущественно горизонтальной ориентации основных трещиноватых дефектов. Видны два контрастных слоя: верхний, более темный, в режиме QBSE (среднее атомное число Z ниже), соответствующий алюминийсодержащей фазе, и нижний – более светлый, богатый медью. Между этими слоями четко прослеживается зона контакта с неровностями профиля высотой 5...15 мкм, что указывает на интенсивный процесс смешивания материалов при высокой температуре и давлении в зоне фрикционного воздействия [11].

При дальнейшем увеличении (рис. 2б, 2в) становится очевидной мозаичная структура поверхности с четко выраженной полигонизацией. Поверхность разбивается на ячейки размером 20...80 мкм, ограниченные сетью микротрещин шириной от 0,5 до 3 мкм. Контраст в изображениях QBSE позволяет различить области с различным химическим составом: темные участки соответствуют алюминию и его оксидам, светлые области обогащены медью. Наблюдается характерная «чешуйчатая» морфология, типичная для процессов адгезионного переноса материала при фрикционном нанесении, с отдельными выступами и кратерами размером 10...30 мкм, являющимися следами локального схватывания и разрыва микросварных соединений между контактирующими поверхностями [12]. В матрице покрытия равномерно распределены мелкодисперсные включения размером 1...5 мкм, которые согласно последующему анализу RBS представляют собой оксидные частицы.

Детальное исследование микроструктуры при больших увеличениях (рис. 2г) выявляет сложную систему дефектов. Трещины имеют разветвленную дендритную морфологию с характерным поперечным размером открытия 0,1...0,5 мкм и проникают на глубину до 5...10 мкм, что видно по теневым контрастам на боковых стенках трещин. Поверхность покрытия демонстрирует высокий уровень шероховатости, развитой в результате интенсивной пластической деформации. Количественная оценка СЭМ-изображений характерных участков площадью 20×20 мкм показала среднее арифметическое отклонение профиля R_a 1,2...1,8 мкм. Микрорельеф формируется суперпозицией пластических деформаций,

сдвиговых полос и микропор, возникающих в результате термомеханических напряжений при циклическом нагружении в процессе нанесения [13]. Между стенками трещин наблюдаются перемычки материала, что прямо указывает на процесс пластической деформации и релаксации напряжений, предшествовавший окончательному разрушению.

При максимальном увеличении (рис. 2д, 2е) наблюдается ультрамелкозернистая структура покрытия с размером субзерен 0,5...2 мкм. Поверхность на этом уровне представляет собой композицию из мелких кристаллитов, спекшихся между собой, с четко видимыми границами зерен и выходами дислокаций. Присутствуют наноразмерные частицы (50...200 нм), агрегированные в кластеры до 1...2 мкм, которые, по-видимому, являются оксидами алюминия (Al_2O_3), образующимися в результате термической активации поверхности при фрикционном нагреве. Текстура поверхности носит выраженный «клеточный» характер с ячейками размером 2...5 мкм, разделенными трещинами шириной менее 100 нм, что соответствует стадии зарождения и роста трещин усталости в условиях циклического теплового и механического нагружения [14].

Для количественной оценки морфологии поверхности проведен фрактальный анализ системы трещин методом равномерных сеток. Анализ охватывал все масштабные уровни от 300 мкм до 10 мкм, соответствующие диапазону увеличений от $100 \times$ до $4010 \times$. В каждом изображении выделялась бинарная маска трещин с использованием детектора краев Кэнни с последующей скелетизацией для уточнения геометрии линий дефектов. На рисунке 3 показана зависимость фрактальной размерности (D_f) системы трещин от увеличения при СЭМ-анализе медно-алюминиевого покрытия.

Установлено, что фрактальная размерность трещиноватой структуры D_f составляет в среднем $1,917 \pm 0,076$ при коэффициенте вариации 4,0%. Это свидетельствует о высокой степени самоподобия и структурной устойчивости морфологии поверхности в широком диапазоне масштабов. Значения D_f изменяются от 1,793 ($198 \times$) до 2,000 ($2210 \times$), приближаясь к евклидовой размерности 2 при переходе к наномасштабам, что указывает на эффективное заполнение поверхности сложной разветвленной системой микротрещин с развитой структурой, характерной для процессов фрактального роста дефектов в условиях диффузионно-контролируемой релаксации напряжений. Масштабная зависимость фрактальной размерности показывает плато в диапазоне $480 \times \dots 4010 \times$ ($D_f \approx 1,96 \dots 2,00$), что соответствует переходу к универсальному режиму роста трещин,

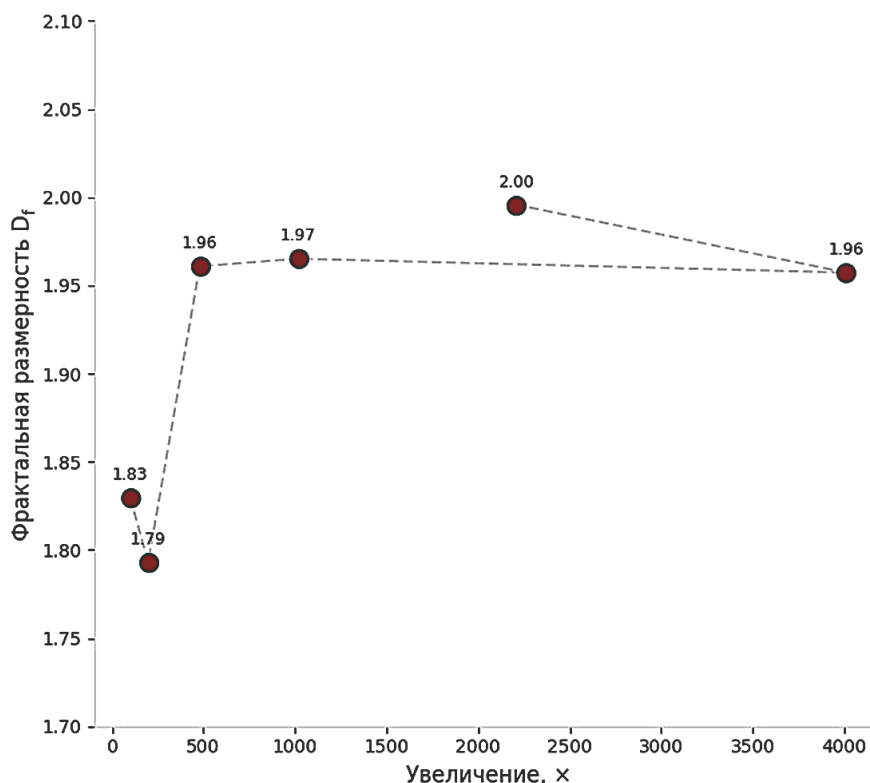


Рис. 3. Зависимость фрактальной размерности (D_f) системы трещин от увеличения при СЭМ-анализе медно-алюминиевого покрытия

Fig. 3. Relationship between the fractal dimension (D_f) of the crack system and magnification during SEM analysis of the copper-aluminum coating

который не зависит от макроскопических граничных условий [15].

На рисунке 4 показана гистограмма распределения углов ориентации линейных дефектов в медно-алюминиевом покрытии. Анализ ориентационного распределения трещин на изображениях с максимальным разрешением выявил преимущественно горизонтальную направленность с максимумом распределения углов около 0° относительно направления фрикционной обработки. Параметр ориентационного порядка $S = 0,513$ подтверждает умеренную анизотропию структуры, обусловленную направленностью процесса пластического течения материала в зоне контакта. Плотность дефектов (относительная площадь, занятая трещинами) составляет в среднем 33,7%, монотонно возрастающая с уменьшением масштаба и достигая 45,7% на уровне 10 мкм, что коррелирует с плотностью межзеренных границ в ультрамелкозернистых материалах, полученных методами интенсивной пластической деформации.

Спектроскопия резерфордовского обратного рассеяния (RBS) с пучком α -частиц с энергией 2 МэВ (углы падения $\alpha = 30^\circ$, угол рассеяния $\theta = 170^\circ$) подтвердила слоистую структуру покрытия, выявленную методом СЭМ. Спектры RBS, представленные на рисунке 5, показывают три характерных

энергетических пика, соответствующих присутствующим в системе элементам: кислороду (O) с энергией края около 0,7 МэВ; алюминию (Al) с энергией 1,1 МэВ; меди (Cu) с энергией 1,5 МэВ.

Отличная корреляция экспериментальных данных (сплошная линия) с результатами моделирования (пунктирная линия) позволяет количественно оценить глубинное распределение элементов и толщину слоев. Поверхностный пик кислорода (рис. 5, энергия $\sim 0,7$ МэВ) с высокой интенсивностью указывает на образование оксидной пленки на поверхности покрытия толщиной порядка 5...15 нм (оценка по ширине пика), что коррелирует с наблюдением мелкодисперсных оксидных частиц на СЭМ-изображениях высокого разрешения (рис. 2д, 2е). Присутствие кислорода преимущественно в поверхностном слое подтверждает термоактивированный механизм окисления алюминия при фрикционном нагреве, приводящий к формированию защитной пленки Al_2O_3 , видимой в СЭМ как темные включения в матрице покрытия. Плато за пиком O и до пика Al соответствует смешанному слою Al-Cu с переменным составом.

Пик алюминия (рис. 5, энергия $\sim 1,1$ МэВ) с относительно низкой энергией края поглощения (смещение относительно табличного значения для

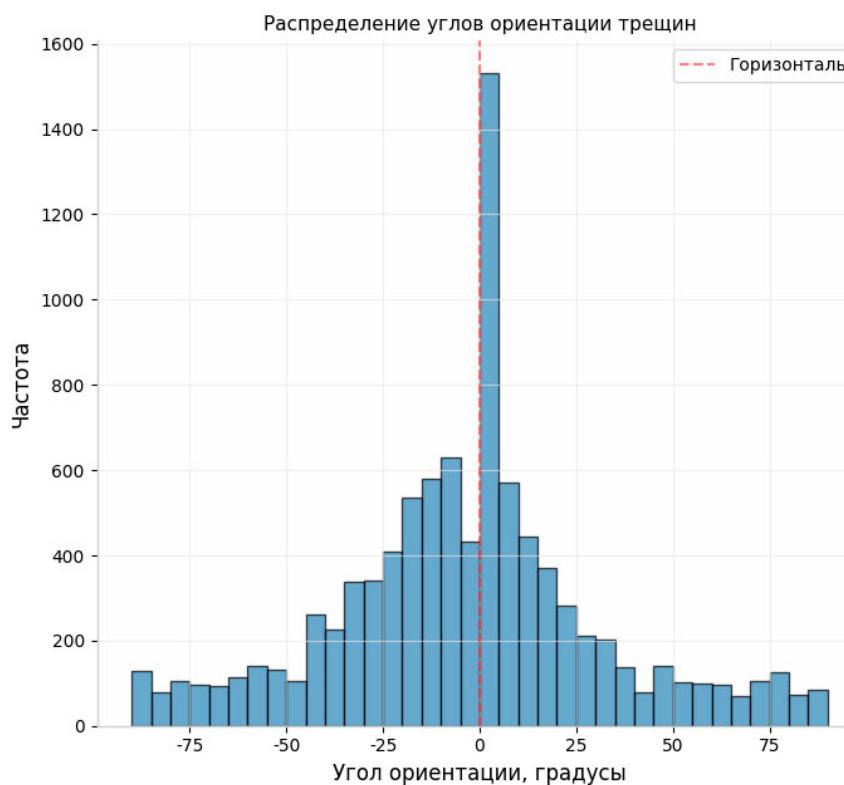


Рис. 4. Гистограмма распределения углов ориентации линейных дефектов (трещин) в медно-алюминиевом покрытии

Fig. 4. Histogram of the distribution of orientation angles of linear defects (cracks) in a copper-aluminum coating

чистого Al) свидетельствует о расположении алюминийсодержащего слоя непосредственно под поверхностной оксидной пленкой, что согласуется с СЭМ-данными о преобладании алюминия в верхнем слое покрытия (темный контраст на рисунке 2а-2в). Ширина пика Al указывает на толщину слоя порядка 0,5...1,0 мкм и наличие градиентного перехода к подложке, что объясняет наблюдаемую

в СЭМ «чешуйчатую» структуру с переменным контрастом по толщине.

Интенсивный пик меди (рис. 5, энергия ~1,5 МэВ) с характерным наклоном переднего фронта соответствует основному материалу подложки или нижнему слою покрытия, богатому медью. Смещение края пика Cu к более низким энергиям относительно табличного значения для массивной меди указывает

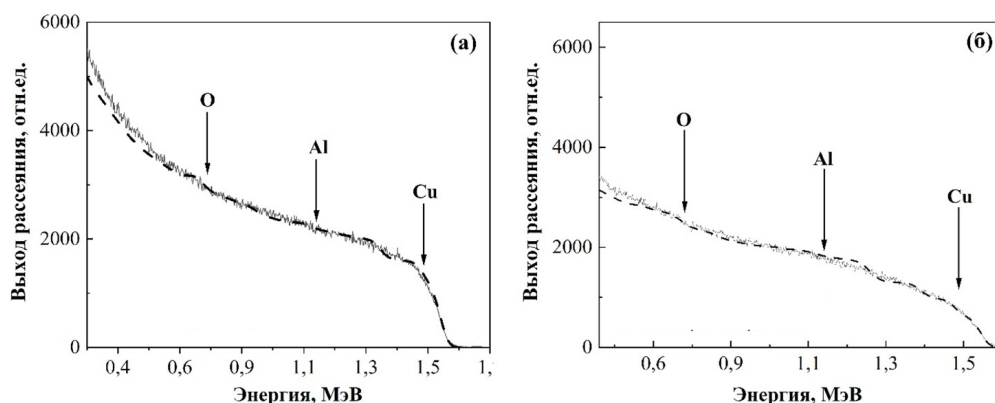


Рис. 5. Спектры RBS ($E = 2$ МэВ, $\alpha = 30^\circ$, $\theta = 170^\circ$) для двух образцов с Cu-Al-покрытиями, нанесенными фрикционным наплавлением:

а) толщина ~1,8 мкм; б) толщина ~3,2 мкм; — эксперимент, ---- модель (SIMNRA); стрелками указаны энергетические края сигнатур O, Al и Cu

Fig. 5. RBS spectra ($E = 2$ MeV, $\alpha = 30^\circ$, $\theta = 170^\circ$) for two samples with Cu-Al particles deposited by friction fusion: a) thickness ~1.8 μm ; b) thickness ~3.2 μm ; solid line – experiment, dashed line – model (SIMNRA); arrows indicate the energy edges of the O, Al and Cu signatures

на наличие межфазной границы Al/Cu с шероховатостью, оцениваемой по фрактальным данным, СЭМ ($D_f \approx 1,92$). Высокая интенсивность сигнала Cu подтверждает, что фрикционное покрытие имеет двухслойную структуру: верхний слой обогащен алюминием и его оксидами, нижний слой – медный.

Корреляция между методами позволяет интерпретировать трещиноватость, наблюдаемую на СЭМ-изображениях (рис. 2б, 2в, 2г), как результат термомеханических напряжений, возникающих при охлаждении системы вследствие различия коэффициентов температурного расширения ($\alpha_{Al} \approx 23 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $\alpha_{Cu} \approx 17 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) и образования оксидов с объемным расширением. Фрактальная размерность трещин $D_f \approx 1,92$, близкая к значениям для диффузионно-релаксированных поверхностей, свидетельствует о том, что рост дефектов происходил в условиях активной междиффузии Al-Cu с образованием интерметаллидов, обогащающих границы зерен и способствующих хрупкому разрушению при термических циклах.

Таким образом, комплексный анализ СЭМ и RBS подтверждает формирование многослойной структуры покрытия с термодинамически стабильной многоуровневой структурой: оксидная пленка Al_2O_3 (на поверхности) → слой алюминия с примесями меди (основной объем покрытия) → переходная диффузионная зона Al-Cu → медная подложка. Фрактальная природа трещиноватой структуры и высокая плотность дефектов (33...46%) обусловлены особенностями фрикционного нанесения, сочетающего интенсивный пластический деформационный перенос материала с высокотемпературной активацией диффузионных процессов и окисления.

Выводы

1. Комплексное исследование медно-алюминиевых покрытий, полученных методом фрикционного натирания, с применением СЭМ, фрактального

анализа и спектроскопии резерфордовского обратного рассеяния, выявило закономерности формирования их многоуровневой структуры.

2. В результате фрикционного воздействия формируется многослойная система: наноразмерная оксидная пленка Al_2O_3 (5...15 нм), основной слой с градиентным распределением меди (0,5...1,0 мкм), диффузионная зона Al-Cu и медная подложка; данные RBS подтвердили интенсивную взаимную диффузию на границе раздела.

3. Поверхность характеризуется масштабно-инвариантной неоднородностью с иерархией дефектов: от мозаичной полигонизации (20...80 мкм) до ультрамелкозернистой структуры (0,5...2 мкм) и наноразмерных оксидных включений (50...200 нм). Фрактальный анализ трещин показал высокую степень самоподобия (диапазон масштабов 10...300 мкм), среднюю размерность $D_f = 1,917 \pm 0,076$ и плотность дефектов 33,7...45,7%, что обусловлено совместным действием пластической деформации, термических напряжений (ввиду различия КТР компонентов) и диффузионных процессов; умеренная анизотропия трещин ($S = 0,513$) отражает направленность фрикционного воздействия.

4. Трещинообразование носит термомеханический характер, инициируясь напряжениями при охлаждении и усугубляясь образованием хрупких интерметаллидов в зоне диффузии, тогда как фрикционный нагрев одновременно способствует поверхностному окислению алюминия.

5. Уникальные триботехнические свойства покрытий (высокая адгезия и износостойкость) напрямую связаны с их дефектной фрактальной организацией, что создает основу для целенаправленной оптимизации режимов фрикционного нанесения с целью управления структурой и функциональными характеристиками биметаллических систем.

Список источников

1. Аверин В.А., Евенко В.В. Современные возможности защиты машин и оборудования от фрикционного, абразивного и коррозионного износа // Новые материалы и технологии в машиностроении. 2023. № 37. С. 76-78. EDN: CURRRT
2. Balabanov V.I., Dobryakov D.V., Alipichev A.Yu. Developing the technology of friction alitising. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2023;25(5):52-56. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-5-52-56>
3. Benraouda A. Optimal control for an elastic frictional contact problem. *Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics* 2024;17(2):151-161. EDN: AAVCFR
4. Погоньшев В.А., Мокшин И.А., Погоньшева Д.А. Условия формирования качественного покрытия при финишной антифрикционной безабразивной обработке // Упрочняющие технологии и покрытия. 2023. Т. 19, № 6 (222). С. 247-249. EDN: TZPPMM

References

1. Averin V.A. Evenko, V.V. Modern possibilities of protection of machinery and equipment from friction, abrasive and corrosive wear. *Novye materialy i tekhnologii v mashinostroyenii*. 2023;37:76-78. (In Russ.)
2. Balabanov V.I., Dobryakov D.V., Alipichev A.Yu. Developing the technology of friction alitising. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2023;25(5):52-56. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-5-52-56>
3. Benraouda A. Optimal control for an elastic frictional contact problem. *Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics* 2024;17(2):151-161.
4. Pogonyshev V.A., Mokshin I.A., Pogonysheva D.A. Conditions for formation of high-quality coating during finishing antifriction non-abrasive treatment. *Strengthening Technologies and Coatings*. 2023;19(6):247-249. (In Russ.)

5. Букреев О., Пилушина Г.А. Перспективные материалы для фрикционных механизмов машин лесного комплекса // Новые материалы и технологии в машиностроении. 2021. № 34. С. 89-93. EDN: OVKHYS
6. Балабанов В.И., Ивахненко Н.Н., Добряков Д.В., Дорош-кевич А.С., Кругляк А.И. Исследование структуры покрытий, полученных методом фрикционного алитирования // Техника и оборудование для села. 2026. № 1. С. 34-37. EDN: FLPAHZ
7. Goryacheva I.G., Meshcheryakova A.R. Modeling of surface fracture in friction interaction of fiber composites. *Journal of Siberian Federal Universit. Mathematics and Physics*. 2021;14(6):690-699. EDN: KBIZGB
8. Балабанов В.И., Голубев И.Г., Добряков Д.В. Совершенствование технологического процесса фрикционного нанесения защитных покрытий // Техника и оборудование для села. 2023. № 10 (316). С. 31-34. EDN: FCIBDY
9. Касимов Р.М., Алехина Р.А., Блинов Н.Д., Свиридов А.С. Исследование влияния разбавителя на реологические и технологические свойства эпоксидных композиций // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 5. С. 68-74. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-5-68-74>
10. Куksenova L.I., Kozlov D.A., Alekseeva M.S. Влияние структуры медных покрытий на работоспособность тяжело-нагруженных стальных пар трения // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2022. № 4 (354). С. 150-160. EDN: PSUAV
11. Куksenova L.I., Kozlov D.A., Alekseeva M.S. Триботехнические и структурные характеристики модифицированных медью поверхностных слоев тяжело нагруженных сопряжений // Трение и износ. 2021. Т. 42, № 5. С. 596-608. EDN: XNLYUV
12. Kharytonchik S.V., Kussyak V.A., Le N.V. Control of pneumatic actuator for automated mechanical transmission dry friction clutch base on the pulse width modulation signal. *Science and Technique*. 2021;20(1):26-32. EDN: WUTAOQ
13. Балабанов В.И., Ивахненко Н.Н., Добряков Д.В. Теоретические основы нанесения антиизносных покрытий // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 5. С. 61-67. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-5-61-67>
14. Yusubov F. The impact of surface-active inert lubricants on brake friction composites. *Journal of Technical Research*. 2024;10(3):54-60. EDN: STIJST
15. Javadov M.Y., Volchenko D.A., Skrypnyk V.S. et al. Physical methods for evaluating the load of friction pairs of braking devices (Part I). *Herald of the Azerbaijan Engineering Academy*. 2021;13(2):58-68. https://doi.org/10.52171/2076-0515_2021_13_02_58_68

Информация об авторах

- ¹ Балабанов Виктор Иванович, д-р техн. наук, профессор; vbalabanov@rgau-msha.ru; и.о. заведующего кафедрой сельскохозяйственного строительства; <https://orcid.org/0000-0001-6486-6485>; SPIN-код: 1885-6817
- ² Ивахненко Наталья Николаевна, канд. физ.-мат. наук, доцент; доцент кафедры физики; ivakhnenko_nn@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7328-7634>; SPIN-код: 5082-0613
- ³ Борулько Вячеслав Григорьевич, д-р техн. наук; и.о. заведующего кафедрой техносферной безопасности; vborulko@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3221-3567>; SPIN-код: 9252-5835
- ⁴ Добряков Дмитрий Викторович, аспирант; dimasdobr@rambler.ru
- ⁵ Кругляк Анастасия Игоревна, инженер Сектора ядерно-физического материаловедения

Author Information

- Viktor I. Balabanov¹, DSc (Eng), Professor; vbalabanov@rgau-msha.ru; Acting Head of the Department of Agricultural Construction; <https://orcid.org/0000-0001-6486-6485>
- Natalya N. Ivakhnenko², CSc (Phys. – Math.), Associate Professor; Associate Professor of the Department of Physics; ivakhnenko_nn@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7328-7634>
- Vyacheslav G. Borulko³, DSc (Eng); Acting Head of the Department of Technosphere Safety; vborulko@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3221-3567>
- Dmitry V. Dobryakov⁴, postgraduate student, dimasdobr@rambler.ru
- Anastasia I. Kruglyak⁵, Engineer, Sector of Nuclear-Physical Materials Science and Ion-Implantation Nanotechnologies, kruglyakai@ya.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0773-9919>

и ионно-имплантационных нанотехнологий;
kruglyakai@ya.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0773-9919>;
SPIN-код: 1337-3660

⁶ **Бадекин Максим Юрьевич**, старший преподаватель
кафедры техносферной безопасности; korund2002@list.ru;
<http://orcid.org/0000-0002-3911-5900>; SPIN-код: 1447-7503

^{1, 2, 3, 6} Российский государственный аграрный университет –
МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434,
Российская Федерация, г. Москва, Тимирязевская ул., 49

⁴ Российский научно-исследовательский институт информации
и технико-экономических исследований
по инженерно-техническому обеспечению
агропромышленного комплекса; 141261,
Российская Федерация, Московская область, Пушкинский
р-н, р.п. Правдинский, ул. Лесная, 60

⁵ Объединенный институт ядерных исследований; 141980,
Российская Федерация, Московская обл., г. Дубна,
ул. Жолио-Кюри, 6

Вклад авторов

В.И. Балабанов – концептуализация, руководство исследования-
ми, администрирование проекта, создание черновика рукописи,
редактирование окончательной версии;

Н.Н. Ивахненко – методология, проведение исследований, ве-
рификация данных;

В.Г. Борулько – руководство исследованиями, методология, про-
ведение исследований;

Д.В. Добряков – проведение исследований, верификация дан-
ных, ресурсы;

А.И. Кругляк – формальный анализ, программное обеспечение,
верификация данных;

М.Ю. Бадекин – формальный анализ, программное обеспечение,
визуализация, создание черновика рукописи.

Статья поступила 18.02.2025, после рецензирования
и доработки 27.04.2026, принята к публикации 14.05.2026

Maxim Yu. Badekin⁶, Senior Lecturer, the Department
of Technosphere Safety; korund2002@list.ru;
<http://orcid.org/0000-0002-3911-5900>

^{1, 2, 3, 6} Russian State Agrarian University –
Moscow Timiryazev Agricultural Academy: 127434,
Russian Federation, Moscow, Timiryazevskaya Str., 49

⁴ Russian Research Institute of Information and Technical and
Economic Research in Engineering and Technical Support
of the Agro-Industrial Sector (Rosinformagrotekh); 141261,
Moscow Region, Pushkino District, Pravdinsky,
Lesnaya Str., 60

⁵ Joint Institute for Nuclear Research: 141980, Russian Federation,
Moscow Region, Dubna, Joliot-Curie Str., 6

Author Contribution

V.I. Balabanov – conceptualization, project supervision, project ad-
ministration, writing – original draft, manuscript review and editing;

N.N. Ivakhnenko – methodology, investigation, data verification;

V.G. Borulko – research supervision, methodology, investigation;

D.V. Dobryakov – investigation, data verification, resources;

A.I. Kruglyak – formal analysis, software, data verification;

M.Yu. Badekin – formal analysis, software, visualization, writing –
original draft.

Received 18.02.2025; Revised 27.04.2026; Accepted 14.05.2026

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.171:004.832.28:007.51

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-3-84-93>

Интеллектуальная модель управления надежностью эксплуатируемой сельскохозяйственной техники

С.Л. Никитченко

Ростовский государственный университет путей сообщения; г. Ростов-на-Дону, Россия

binom_a@rambler.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4480-9659>

Аннотация. Сельскохозяйственная техника, как основной производственный актив предприятия, нуждается в специальной информационной системе управления. Управление надежностью эксплуатируемой сельскохозяйственной техники представляет собой актуальную и сложную задачу. Низкий уровень внедрения средств поддержки принятия решений и субъективное управление процессами технического обслуживания и ремонта без учета факторов и данных объективного контроля приводят к неэффективным управленческим решениям. Исследования проведены с целью разработки интеллектуальной модели управления надежностью эксплуатируемой сельскохозяйственной техники на принципах процессного подхода, с учетом допустимого уровня вероятности безотказной работы (риска), ремонтпригодности, условий эксплуатации и стоимости потерь, ориентированной на максимальное выведение инженера из процесса формирования управленческих решений. В основе разработанной модели заложена искусственная интеллектуальная система управления с набором базовых алгоритмов в сочетании с устройствами дистанционного сбора информации о техническом состоянии составных частей машин. Разработан алгоритм автономного составления и редактирования графика технического обслуживания с учетом технико-экономических и субъективных критериев. Внедрение предлагаемой автоматизированной интеллектуальной модели управления позволит сократить на 40% затраты времени специалистов на типовые управленческие задачи и заменить человека при формировании не менее половины управленческих решений, связанных с поддержанием работоспособности машин. Разработанная интеллектуальная модель управления может быть применима для тракторов, уборочных комбайнов, навесных и прицепных сельскохозяйственных машин. Она позволит реализовать технологию бережливого управления надежностью техники, отражает основную концепцию и принцип действия цифрового двойника инженера по эксплуатации машин.

Ключевые слова: сельскохозяйственная техника; техническое обслуживание; надежность; интеллектуальная система управления; интеллектуальная модель управления; управление надежностью эксплуатируемой сельскохозяйственной техники; инженер; цифровой двойник инженера

Для цитирования: Никитченко С.Л. Интеллектуальная модель управления надежностью эксплуатируемой сельскохозяйственной техники // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 3. С. 84-93. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-3-84-93>

ORIGINAL ARTICLE

Intelligent reliability management model for operated agricultural machinery

S.L. Nikitchenko

Rostov State Transport University; Rostov-on-Don, Russia

binom_a@rambler.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4480-9659>

Abstract. Agricultural machinery, as the primary production asset of an enterprise, requires a specialized information management system. Managing the reliability of operated agricultural machinery presents a relevant and complex challenge. The low level of implementation of decision support tools, combined with subjective maintenance and repair management that fails to account for objective control factors and data, leads to ineffective management decisions. The study aimed to develop an intelligent reliability management model for operated agricultural machinery based on the principles of a process approach. The model takes into account the permissible level of failure-free operation probability (risk), maintainability, operating conditions, and cost of losses, while minimizing the involvement of the engineer in management decision-making. The developed

model is founded on an artificial intelligence management system incorporating a set of core algorithms, integrated with remote data collection tools for assessing the technical condition of machine components. An algorithm has been developed for autonomously making and editing maintenance schedules, taking into consideration both technical-economic and subjective criteria. The implementation of the proposed automated intelligent management model is expected to reduce the time specialists spend on routine management tasks by 40% and to replace human involvement in at least half of the management decisions related to maintaining machine operability. The developed intelligent management model can be applied to tractors, harvesting combines, and mounted and trailed agricultural machines. It will enable the implementation of lean reliability management technology for machinery and reflects the core concept and operating principle of a digital twin of a machine operation engineer.

Keywords: agricultural machinery; maintenance; reliability; intelligent control system; intelligent management model; reliability management of operated agricultural machinery; engineer; digital twin of the engineer

For citation: Nikitchenko S.L. Intelligent reliability management model for operated agricultural machinery. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(3):84-93. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-3-84-93>

Введение

Сельскохозяйственная техника является одним из основных производственных активов предприятий. Управление надежностью активов регламентируется положениями международных стандартов ISO серии 55000 и отечественных стандартов ГОСТ Р 55.0.01-2014, ГОСТ Р 27.001-2009, из которых следует, что без специальной информационной системы невозможно эффективно управлять активами. Современный подход к управлению надежностью эксплуатируемых машин предполагает наличие информационной системы, сочетающей в себе инструменты цифровой экономики Индустрии 4.0 и концепцию Индустрии 5.0, системно объединяющую разрозненные инновации Индустрии 4.0 для достижения социальных и экологических целей с ориентацией на человека [1]. Такая система должна с определенной степенью автономности позволять оперировать нормативно-технической документацией, выполнять удаленное диагностирование составных частей и делать прогноз их остаточного ресурса по измеряемым параметрам технического состояния, выбирать оптимальную стратегию технического обслуживания и ремонта (ТОР), планировать сервисные работы и объемы запасных частей, выполнять анализ уровня надежности обслуживаемых машин, производить учет работ и вести отчетный инженерный документооборот предприятия. При этом процессный подход рассматривается как основа бережливого управления [2]. Также следует выделить задачу корректировки графика технического обслуживания (ТО) машин в период полевых работ после получения новой информации об их состоянии. От качества перепланировки графика ТО зависят будущие затраты труда, расходы материальных средств и уровень надежности техники. Доля ручных операций здесь очень высока, а методы

корректировки недостаточно освещены в источниках литературы.

Автоматизация перечисленных выше задач отработана во многих существующих информационных системах и позволяет почти на 40% сократить затраты времени инженеров на управление процессами ТО машин [3]. Наиболее популярными автоматизированными системами управления (АСУ) ТОР и жизненным циклом машин стали системы типа CMMS (Computerized Maintenance Management System) и EAM-системы (Enterprise Asset Management) [4, 5], которые в интеграции с цифровыми средствами сбора данных являются самыми эффективными инструментами управления надежностью [6-8]. Они позволяют по состоянию машин практиковать перспективные стратегии технического обслуживания (ТО) – например, предиктивное обслуживание (predictive maintenance, PdM). Такие интеллектуальные продукты позволяют снизить простои машин и затраты на эксплуатацию более чем на 30%, а трудоемкость сервисных работ – в 1,5 раза [9]. Дальнейший прогресс в этой области связан с развитием интеллектуальных диагностических систем для дистанционного мониторинга машин [10, 11].

Человек доминирует в процессе управления надежностью сельхозтехники, но это может создавать проблему в крупных производствах. В сложной технической системе, где потоки информации велики, люди физически не в состоянии обработать их оперативно и принять оптимальное управленческое решение. Для этого нужна искусственная интеллектуальная система управления со встроенными в нее базовыми алгоритмами познания предметной области и механизмом запуска активного поведения [12]. Нужно максимально исключить фактор субъективности в принимаемых управленческих решениях

и оградить людей от работы, которую теперь все более уверенно забирают искусственные интеллектуальные системы [13]. Однако в данное время алгоритмы и модели для решения подобных управленческих задач в сельскохозяйственном производстве не разработаны. Наряду с появлением автономной сельскохозяйственной техники разработка модели управления ее надежностью послужит переходом к смарт-технологиям в управлении «умным» сельским хозяйством [14].

Цель исследований: разработать модель управления надежностью эксплуатируемой сельскохозяйственной техники на принципах процессного подхода с учетом допустимого уровня вероятности безотказной работы (риска), ремонтпригодности, условий эксплуатации и стоимости потерь, ориентированную на максимальное выведение инженера из процесса формирования управленческих решений.

Создавая цифровой двойник инженера по эксплуатации машин, можно использовать разработанную модель управления надежностью эксплуатируемой сельскохозяйственной техники.

Материалы и методы

Модель управления надежностью машин реализуется с помощью искусственной интеллектуальной системы управления (ИСУ), включающей в себя четыре базовых алгоритма: 1) выбор стратегии с построением и корректировкой графика ТО; 2) определение причин неисправностей машин; 3) управление объемами запасных частей; 4) контроль выполнения технологического процесса обслуживания. В данной статье рассмотрен только фрагмент алгоритма построения и корректировки графика ТО. Набор алгоритмов для выявления причин неисправностей машин, являющийся основой экспертной системы [15], планируется рассмотреть в отдельной статье. Методики и результаты резервирования запасных частей с помощью генетических алгоритмов и нейронных сетей рассмотрены ранее в работах [16, 17]. Метод контроля выполнения ТО с помощью нейронных сетей описан в работе [18].

Объектом управления являются парк машин и отдельные мобильные энергосредства, участвующие в выполнении конкретных видов полевых работ в соответствии с графиком машиноиспользования. Плановая наработка каждого энергосредства за период полевых работ может быть определена системой без участия человека из данных графика машиноиспользования или путем анализа данных о наработке за прошлые годы [19]. При выполнении полевых операций значения технико-экономических показателей агрегата на базе энергосредства, а также его простой

автоматически фиксируются системой ИСУ. Простой энергосредства в период выполнения конкретной операции сопровождаются стоимостными потерями U для предприятия.

Для энергосредства предусмотрены виды ТО, каждый из которых содержит установленный производителем регламентный перечень O операций ТО и перечень D операций диагностирования. Объект управления рассматривался как набор составных частей, некоторые из которых представляют «умные» устройства. Все составные части характеризуются одним или несколькими параметрами технического состояния. Все множество Ω составных частей разбито на три подмножества.

Техническое обслуживание первого подмножества Ω_I составных частей осуществляется в планово-предупредительном порядке в соответствии с действующим руководством по эксплуатации машины.

Для определения технического состояния второго подмножества Ω_{II} составных частей требуются внешние средства диагностирования и некоторые разборочно-сборочные работы, сопровождающиеся затратами времени. Измеренные значения параметров технического состояния X_i ($i = 1, 2, \dots, k$) в этом случае попадают в базу данных информационной системы в течение кратчайшего промежутка времени, которым можно пренебречь. ТО таких составных частей организуется с учетом их реального технического состояния и прогнозов его динамики до критических значений. Контрольно-диагностические измерения здесь проводятся либо внепланово по заявке, либо по отдельному графику с определенной периодичностью, либо совместно с периодическими ТО составных частей из подмножества Ω_I . Выбор момента проведения ТО также можно определить по некоторому алгоритму с учетом анализа последствий от ожидаемых параметрических отказов.

Третье подмножество Ω_{III} составных частей («умные» устройства) характеризуется возможностью мгновенной индикации текущих значений параметров технического состояния X_j ($j = 1, 2, \dots, m$) с прогнозом их динамики с помощью бортовых штатных средств мониторинга или средств дистанционного (удаленного) диагностирования. Измеренные значения параметров ТС мгновенно попадают в базу данных информационной системы. ТО таких составных частей также организуют с учетом реального технического состояния и последствий возможных отказов.

Все составные части объекта управления имеют известные характеристики безотказности и ремонтпригодности. Перед началом полевых работ

в момент t_0 график ТО объекта управления рационально формировать, ориентируясь на периодичность обслуживания подмножества составных частей Ω_I . Такой подход диктуется юридическими, нормативно-техническими требованиями и заводскими рекомендациями. При достижении наработки t_n на очередное ТО для этих составных частей машины выполняется перечень регламентных сервисных операций O_{I_n} (рис. 1а). Здесь возможны допустимые отклонения моментов проведения ТО по наработке машины.

Далее в график ТО вносятся мероприятия по диагностированию и обслуживанию составных частей из подмножества Ω_{II} (рис. 1б). Для многих отечественных тракторов и комбайнов моменты проведения диагностирования составных частей рекомендуется совмещать с плановыми ТО, что является необязательным. Например, перед началом полевых

работ в момент t_0 для составной части из подмножества Ω_{II} значение параметра технического состояния X_i было известно, и система определила остаточный ресурс по параметру, который равен T_{Xiv} . Ближайшее мероприятие диагностирования $D_{II_Xi_m-1}$ по этому параметру система запланировала по некоторому алгоритму до наступления момента t_v , например, совместив его с временем выполнения периодического ТО в момент t_{n-1} .

В момент t_0 результат планируемого на момент t_{n-1} диагностирования является еще неизвестным, не выявлена необходимость выполнения операции технического обслуживания $O_{II_Xi_m-1}$ для восстановления параметра X_i . Но трудоемкости сервисных работ и материальных затрат на ТО нужно планировать, поэтому это обслуживание $O_{II_Xi_m-1}$ система по умолчанию временно привяжет к моменту t_{n-1} . Если результат измерения значений параметра X_i в момент

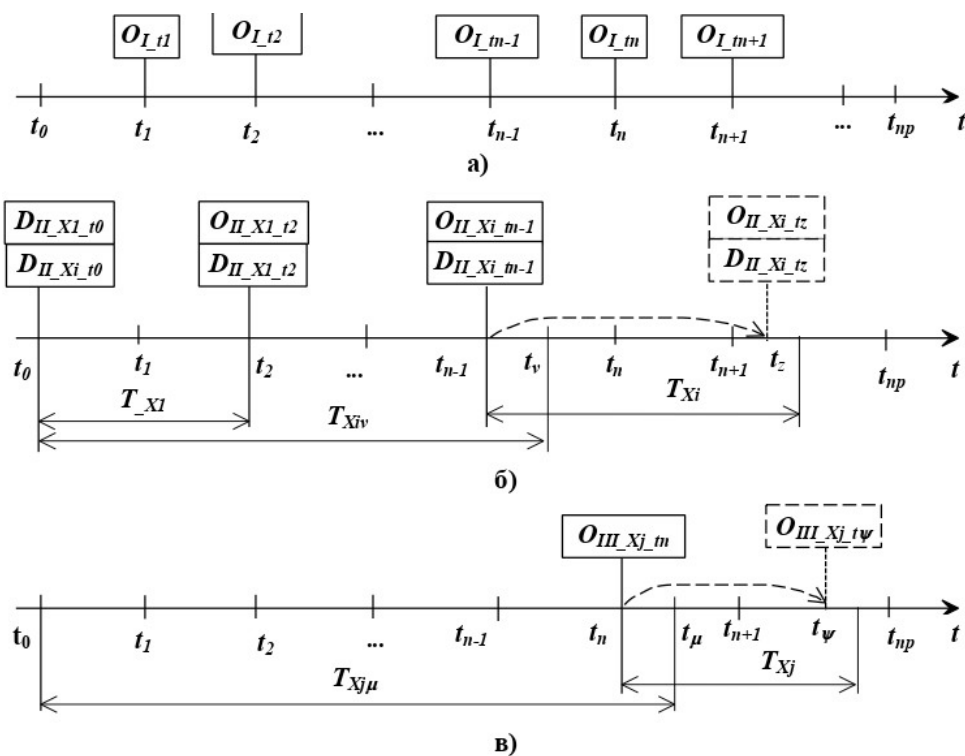


Рис. 1. Определение моментов проведения диагностирования и обслуживания составных частей объекта управления для подмножества Ω_I (а), Ω_{II} (б) и Ω_{III} (в):

O – регламентные сервисные операции; D – мероприятие диагностирования;

t_0, t_{np} – начало и окончание полевых работ; t_n – момент наработки; t_v, t_z – моменты проведения запланированного и перенесенного мероприятия ТО для подмножества Ω_{II} ; T_X – остаточный ресурс по параметру X ;

t_μ, t_ψ – моменты проведения запланированного и перенесенного мероприятия ТО для подмножества Ω_{III} ;

– изначально запланированные работы; – перенесенные работы

Fig. 1. Determining diagnostic and maintenance timing for components of the control object for subsets Ω_I (a), Ω_{II} (б) и Ω_{III} (в):

O – scheduled service operations; D – diagnostic activities; t_0, t_{np} – start and end of field work; t_n – operating time moment; t_v, t_z – moments of scheduled and rescheduled maintenance activities for subset Ω_{II} ; T_X – residual service life according to parameter X ; t_μ, t_ψ – moments of scheduled and rescheduled maintenance activities for subset Ω_{III}

– initially scheduled work; – rescheduled work

t_{n-1} покажет, что обслуживание $O_{\Pi, X_i, m-1}$ проводить еще рано, то система определит новое значение остаточного ресурса T_{X_i} по параметру X_p , выберет более позднее время $t_z \in [t_{n-1} \dots (t_{n-1} + T_{X_i})]$ для проведения нового диагностирования и перенесет операции O_{Π, X_i, t_z} на этот момент t_z .

Построение и редактирование графика технического обслуживания составных частей из подмножества Ω_{III} осуществляются по своему алгоритму аналогично подмножеству Ω_{II} (рис. 1в). Здесь используются средства удаленного мониторинга, которые в режиме онлайн предоставляют информацию о техническом состоянии, поэтому строить и редактировать график мероприятий диагностирования не нужно, а определяется только момент t_{ψ} проведения ТО.

При устранении аварийных отказов в период полевых работ ($t_0 \dots t_{np}$) иногда приходится внепланово выполнять и операции, входящие в регламент конкретного периодического ТО. В этом случае при достижении наработки на данный вид ТО не нужно повторно проводить уже выполненные работы – система перенесет их на более поздние сроки, руководствуясь специальным алгоритмом.

Для прогноза срока предупредительного ТО при индивидуальном измерении параметра технического состояния обычно используют два критерия: вероятность безотказной работы $P(t_z) = 1 - Q(t_z)$ (где $Q(t_z)$ – вероятность возникновения параметрического отказа при наработке t_z) и удельные стоимостные издержки [20].

Удельные издержки $C_{m-1}^{уд}$ на ТО в момент прогноза t_{n-1} и при предупредительном обслуживании в конце этого периода должны превышать сумму вероятных удельных материальных затрат $C_{Txi}^{уд}$ и потерь $U_{Txi}^{уд}$, возникающих при устранении последствий отказа за прогнозируемый период T_{X_i} , равный остаточному ресурсу узла по параметру X_i :

$$C_{m-1}^{уд} \geq U_{Txi}^{уд} + C_{Txi}^{уд}. \quad (1)$$

Для произвольной наработки $t_z \in [t_{n-1} \dots (t_{n-1} + T_{X_i})]$ уравнение (1) можно записать в виде:

$$\frac{C_{X_i}}{t_{n-1}} \geq \frac{U \cdot Q(t_z)}{T_{X_i}} + \frac{C_{X_i} \cdot (1 - Q(t_z))}{T_{X_i}}, \quad (2)$$

где U – суммарные стоимостные потери от простоя машины, руб.; C_{X_i} – абсолютные прямые затраты на проведение ТО по восстановлению параметра X_i (характеристика ремонтпригодности объекта), руб.

В ситуации, когда объект управления проработал какое-то время t_{n-1} и требуется определить вероятность безотказной работы в последующий

промежуток от t_{n-1} до $t_{n-1} + T_{X_i}$, используется условная вероятность [21]:

$$P(t_z < t_{n-1} + T_{X_i} | t_z > t_{n-1}) = \frac{F(t_{n-1} + T_{X_i}) - F(t_{n-1})}{1 - F(t_{n-1})}, \quad (3)$$

где $F(t_{n-1})$ – функция распределения времени появления отказа.

Функция $F(t_{n-1})$ определяется системой на основе накопленной статистики отказов для данного параметра. Фрагмент алгоритма работы системы при управлении техническим состоянием составной части из подмножества Ω_{II} по параметру X_i представлен на рисунке 2. Измеренное значение параметра X_i сравнивается с предельно допускаемыми значениями (шаг 4 алгоритма). Далее принимается решение либо о проведении ТО, либо о поиске нового момента для диагностирования и переносе на этот момент операций ТО. На этапе 11 алгоритма осуществляется прогноз остаточного ресурса T_{X_i} по параметру. Для этого предлагается использовать искусственную нейронную сеть [22]. Далее на этапах 13...17 алгоритма система формирует множество альтернативных решений для искомого момента t_z путем перебора возможных вариантов в диапазоне $(t_{n-1} \dots (t_{n-1} + T_{X_i}))$. Допускаются варианты, для которых условная вероятность безотказной работы объекта по параметру X_i в рассматриваемый момент t_z выше предельного уровня риска R_o , и если выполняется условие экономического критерия (1). Для механизмов, обеспечивающих безопасность движения и ресурс основных агрегатов, $R_o = 0,9 \dots 0,98$; для прочих узлов и систем – $R_o = 0,85 \dots 0,90$.

По приведенному алгоритму система производит параллельные вычисления моментов выполнения восстановительных ТО всех параметров X_p , остаточные ресурсы которых пересекают или накладываются на интервал $(t_{n-1} \dots (t_{n-1} + T_{X_i}))$.

Вычислительные процессы будут выполняться системой постоянно в период времени $(t_0 \dots t_{np})$ для всех параметров технического состояния машины по мере поступления новых данных об их значениях. При этом анализируется возможность объединения имеющихся в рассматриваемом интервале сервисных мероприятий – операций периодических ТО и обслуживаний по состоянию составных частей. Также система анализирует график машиноиспользования объекта управления, «понимает», какие полевые работы объект будет выполнять в рассматриваемый период времени, и осуществляет расчет возможных потерь U от простоя в этот период. Система «видит» свободные от работы дни для объекта (между полевыми операциями); ее можно даже «научить» анализировать прогноз

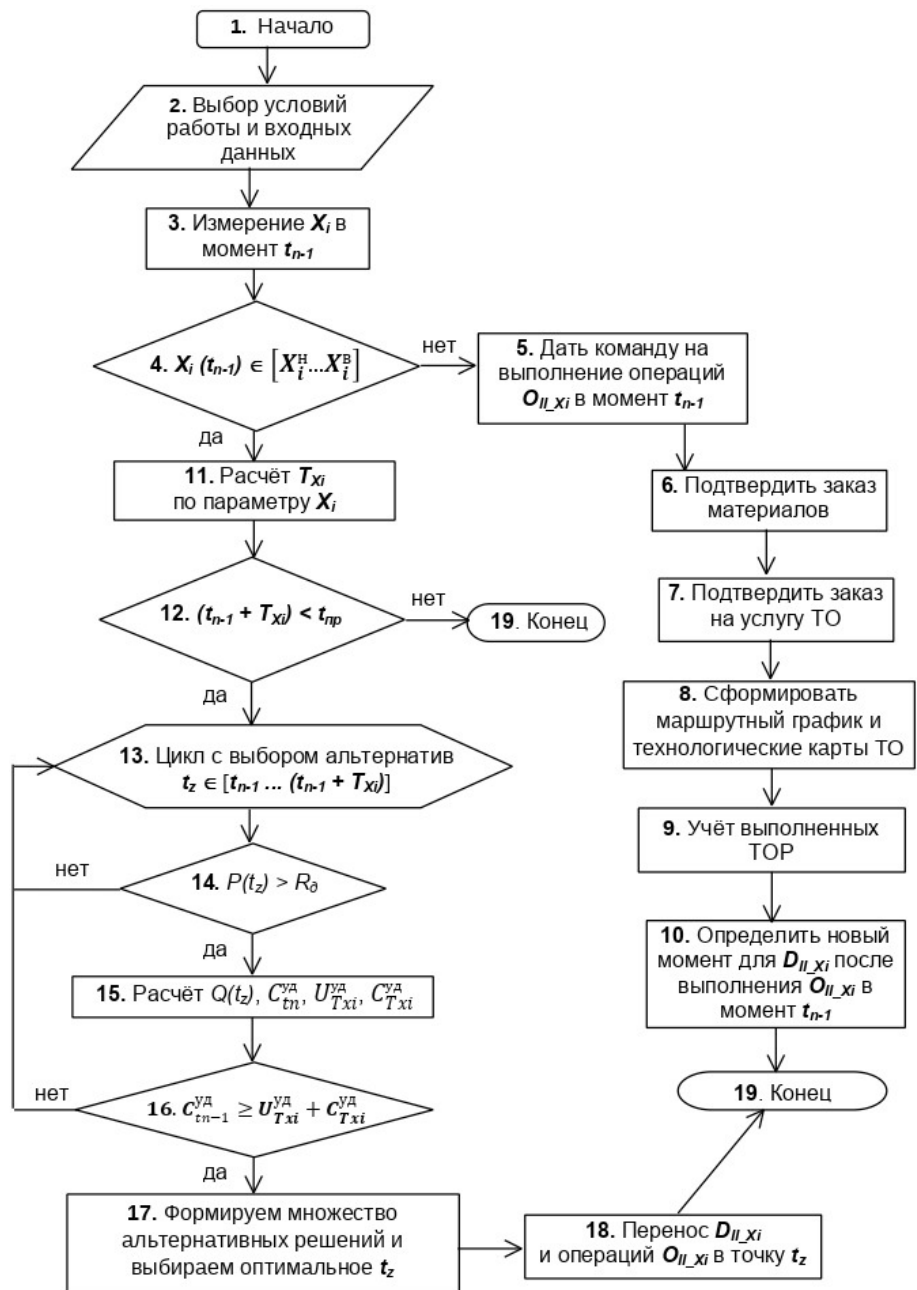


Рис. 2. Блок-схема алгоритма по выбору сроков диагностирования и обслуживания составных частей Ω_{II} по параметру X_i

Fig. 2. Flow chart of the algorithm for selecting diagnostic and maintenance timing for subset Ω_{II} components based on parameter X_i

погоды в сети Интернет и назначать ТО на дождливые дни.

Окончательное множество допустимых вариантов управления в интервале $(t_{n-1}... (t_{n-1} + T_{Xi}))$ формируется системой в виде платежной матрицы (табл.). В строках матрицы размещены альтернативные варианты a_r ($r = 1, \dots, h$) реализации принятой стратегии ТО в виде комбинаций объединения или раздельного выполнения ТО всех составных частей и моментов выполнения, а в столбцах – возможные варианты производственных условий и внешней среды s_q ($q = 1, \dots, g$).

Таблица

Платежная матрица для альтернативных вариантов управления

Table

Payment matrix for alternative management options

Альтернативные варианты управления	Возможные производственные условия			
	s_1	s_2	...	s_g
a_1	ϑ_{11}	ϑ_{12}	...	ϑ_{1g}
a_2	ϑ_{21}	ϑ_{22}	...	ϑ_{2g}
...	...	...	...	...
a_h	ϑ_{h1}	ϑ_{h2}	...	ϑ_{hg}

В качестве вариантов внешних условий могут выступать исполнители, места проведения ТО, применяемое оборудование и др. Каждому r -му варианту управления для каждого q -го внешнего условия система определяет значения эффективности ε_{rq} – суммарные удельные затраты и потери, связанные с проведением всех периодических ТО и операций по восстановлению параметров технического состояния в рассматриваемом интервале, вычисляемые с использованием правой части выражения (2). Далее система выбирает оптимальный вариант организации ТО с минимальными потерями и затратами, с учетом заложенных в нее субъективных предпочтений по аналогии с предпочтениями лица, принимающего решения [23].

По описанному выше принципу может осуществляться управление надежностью уборочных комбайнов, навесных и прицепных сельскохозяйственных машин. Для этого необходимы отдельные исследования по совмещению моментов проведения ТО энергосредства и агрегируемой машины. В данной работе для оценки надежности всех типов машин предприятия за период полевых работ предложено использовать комплексные показатели, регламентированные ГОСТ Р 27.102-2021 и ГОСТ Р 27.010-2019.

Результаты и их обсуждение

Разработанная модель управления надежностью парка машин предприятия представлена на рисунке 3.

В рассматриваемой модели на парк машин непосредственно действуют совокупность активных организационно-технических воздействий A со стороны инженерно-технических работников (ИТР) и операторов машин, а также внешние неуправляемые природно-производственные факторы B . Подсистема управления включает в себя ИТР, сервисную материально-техническую базу (МТБ) предприятия и искусственную самообучающуюся ИСУ, которая выполняет основной объем управленческой деятельности: планирование, учет, документирование сервисных работ, расчет показателей надежности машин. В качестве ИСУ может рассматриваться современная система типа CMMS/EAM, оснащенная программными модулями, которые реализуют перечисленные выше базовые алгоритмы управления, а также цифровыми устройствами, осуществляющими сбор первичных данных с эксплуатируемых машин.

Решения, генерируемые ИСУ, поступают к ИТР и к руководству предприятия в виде графиков ТО,



Рис. 3. Модель управления надежностью эксплуатируемых машин:

ИТР – инженерно-технические работники; МТБ – материально-техническая база; ИСУ – интеллектуальная система управления; A – совокупность активных организационно-технических воздействий; B – неуправляемые природно-производственные факторы; M – множество управляющих сигналов со стороны руководства предприятия; D – множество отчетных документов; Y – множество выходных показателей управляемого объекта; $\{y_{if}\}$, $\{y_{in}\}$ – множества фактических и нормативных значений выходных показателей управляемого объекта соответственно
 ⇨ – активные управляющие воздействия ИТР и операторов машин;
 → – обратная связь; ⇨ – команды сверху; - - - → – внешние неуправляемые факторы

Fig. 3. Reliability management model for operated machinery:

ИТР – engineering and technical workers; МТБ – material and technical base; ИСУ – intelligent control system; A – set of active organizational and technical influences; B – uncontrollable natural and production factors; M – set of control signals from enterprise management; D – set of reporting documents; Y – set of output indicators of the controlled object; $\{y_{if}\}$, $\{y_{in}\}$ – respectively, sets of actual and standard values of the output indicators of the controlled object
 ⇨ – active control actions by technical staff and machine operators;
 → – feedback; ⇨ – top-down instructions; - - - → – external uncontrollable factors

причин выявленных неисправностей, обнаруженных нарушений технологии ТО, показателей надежности, заявок на запасные части и эксплуатационные материалы, актов работ, технологических карт и маршрутно-технологических графиков ТО [24]. Совокупность активных воздействий A со стороны ИТР на объекты парка машин – это выполнение операций ТО в объемах и при сроках, рекомендуемых ИСУ, финальная оценка качества сервисных работ, анализ надежности.

Множество выходных показателей Y представляет собой параметры технического состояния машин, значения наработки, времени их простоя по техническим причинам и технико-экономические показатели. Обратная связь в модели образуется из фактических значений выходных параметров $\{y_{if}\}$, их нормативных значений $\{y_{in}\}$, содержащихся в базе данных ИСУ, и их сравнения. В качестве инструментов сравнения в обратной связи выступают базовые алгоритмы системы ИСУ. Отдельную ветвь обратной связи образует множество отчетных документов D , генерируемых ИСУ (акты работ, ведомости, отчеты, заявки, согласования), которые доступны руководству в электронном виде. Поток информации D вызывает множество M управляющих сигналов со стороны руководства предприятия, которые ИТР также трансформируют в активные воздействия на объект управления. Главным отличием предлагаемой модели управления от существующих является наличие в ней искусственного механизма принятия управленческих решений в виде системы ИСУ, которая образует единое информационное

пространство для инженерной службы и руководства предприятия и связывает все этапы процессного управления надежностью машин. Процессный подход с автоматизацией управления ТО машин реализован в программном обеспечении «Агрокомплекс-3.1 „Техническое обслуживание машин“» (Свидетельство о государственной регистрации ПрЭВМ № 2026611993), которое является интернет-платформой для дальнейших разработок и исследований интеллектуальных методов управления надежностью техники.

Выводы

1. Интеллектуальная система управления может выполнять без участия человека не менее половины управленческих решений.

2. Разработанный алгоритм по выбору сроков диагностирования и обслуживания составных частей позволяет информационной системе автономно строить и редактировать графики сервисных мероприятий для сельскохозяйственной техники с учетом фактического технического состояния составных частей, ремонтпригодности, условий эксплуатации и стоимости потерь от простоя машин на обслуживании.

3. Результаты исследований приносят новые знания в технологию бережливого управления производственными активами предприятий и в совершенствование их технической эксплуатации, а также новые идеи в концепцию и принципы функционирования цифрового двойника инженера по эксплуатации машин.

Список источников

1. Шестаков Р.Б., Филиппова-Глебова А.И., Яковлев Н.А. От индустрии 4.0 к индустрии 5.0: формирование, развитие, проблемы и перспективы // Вестник техносферной безопасности и сельского развития. 2024. № 3 (38). С. 15-18. EDN: TYZQOD
2. Ляндау Ю.В. История развития процессного подхода к управлению // Экономика, статистика и информатика: Вестник УМО. 2013. № 6. С. 65-68. EDN: RPKPGL
3. Никитченко С.Л., Лесник Н.А., Смыков С.В. Управление техническим обслуживанием сельскохозяйственной техники в условиях автоматизации и цифровизации производства // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 4. С. 33-42. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-4-33-42>
4. Wienker M., Henderson K., Volkerts J. The computerized maintenance management system an essential tool for world class maintenance. *Procedia Engineering*. 2016;138:413-420. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.02.100>
5. Никитченко С.Л., Капкаев А.А., Юхнов В.И., Муконина М.И. Управление жизненным циклом сельскохозяйственной техники на этапе эксплуатации в условиях цифровизации производства // Аграрный научный журнал. 2023. № 10. С. 194-204. <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2023i10pp194-204>

References

1. Shestakov R.B., Filippova-Glebova A.I., Yakovlev N.A. From Industry 4.0 to Industry 5.0: Formation, development, problems and prospects. *Vestnik tekhnosfernoj bezopasnosti i selskogo razvitiya*. 2024;3:15-18 (In Russ.).
2. Lyandau U.V. The development of the process-based approach to management. *Ekonomika, statistika i informatika. Vestnik UMO*. 2013;6:65-68 (In Russ.).
3. Nikitchenko S.L., Lesnik N.A., Smykov S.V. Management of agricultural machinery maintenance under the automation and digitalization of production. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2023;25(4):33-42. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-4-33-42>
4. Wienker M., Henderson K., Volkerts J. The computerized maintenance management system an essential tool for world class maintenance. *Procedia Engineering*. 2016;138:413-420. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.02.100>
5. Nikitchenko S.L., Kapkaev A.A., Yukhnov V.I., et al. Life cycle management of agricultural machinery at the operational stage in the conditions of digitalization of production. *The Agrarian Scientific Journal*. 2023;10:194-204 (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2023i10pp194-204>
6. AlDhaibani A.M. Enhancing SCADA system asset maintenance in modern power utilities: integrating

6. Aldhaibani A.M. Enhancing SCADA system asset maintenance in modern power utilities: integrating advanced strategies and emerging technologies. *International Journal of Science and Research (IJSR)*. 2023;12(12):1136-1141. <https://doi.org/10.21275/sr23906105232>
7. Дымкова С.С. Облачные ИОТ платформы и приложения для оптимизационного управления транспортом // REDS: Телекоммуникационные устройства и системы. 2020. Т. 10, № 4. С. 39-50. EDN: PZAATR
8. Fu Y., Zhu G., Zhu M., Xuan F. Digital twin for integration of design-manufacturing-maintenance: An overview. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2022;35:80. <https://doi.org/10.1186/s10033-022-00760-x>
9. 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>
10. Костомахин М.Н., Петрищев Н.А., Воронов А.Н., Саяпин А.С. Экспериментальная система дистанционного мониторинга технического состояния самоходных сельскохозяйственных машин // Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт. 2019. № 10. С. 48-57. EDN: BEHSQX
11. Никитченко С.Л., Игнатъева О.В. Выбор элементов системы для дистанционного диагностирования технического состояния гидропривода // Интеллектуальный транспорт. 2025. Т. 9, № 1 (33). С. 68-76. EDN: BKKBEV
12. Виноградов Г.П. Модель субъективно рационального принятия решений с выбираемыми описаниями картины мира и структуры интересов // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2018. № 2 (10). С. 42-51. EDN: YLWPVZ
13. Душкин Р.В., Андронов М.Г. Гибридная схема построения искусственных интеллектуальных систем // Кибернетика и программирование. 2019. № 4. С. 51-58. <https://doi.org/10.25136/2644-5522.2019.4.29809>
14. Никитченко С.Л., Игнатъева О.В., Лященко А.М. Инженерно-техническое обеспечение АПК в провинции Хэнань Китайской Народной Республики // Технический сервис машин. 2024. Т. 62, № 3. С. 7-16. EDN: MIYOJO
15. Чечет В.А., Левшин А.Г., Скороходов А.Н., Егоров В.В. Основные положения системной диагностики машин // Вестник федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». 2018. № 6 (88). С. 51-55. EDN: YQDQQX
16. Никитченко С.Л., Гринченков Д.В. Совершенствование методов резервирования запасных частей для сельскохозяйственной техники на основе генетических алгоритмов // Агроинженерия. 2022. Т. 24, № 6. С. 25-31. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-6-25-31>
17. Никитченко С.Л., Зырянкина К.Э. Прогнозирование потребности в запасных частях гидросистем машин с применением нейронной сети // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2024. № 2. С. 15-24. EDN: GDFFKW
18. Захаров Н.С., Козин Е.С. Контроль выполнения технологического процесса обслуживания и ремонта автомобилей с использованием нейронных сетей // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2023. № 4 (60). С. 43-51. EDN: NAQINB
19. Никитченко С.Л., Лященко З.В., Глазунов Д.В. Совершенствование организации технического обслуживания тракторов с учетом годовой плановой наработки // Технический сервис машин. 2025. Т. 63, № 2. С. 22-31. EDN: IFMZKY
- advanced strategies and emerging technologies. *International Journal of Science and Research (IJSR)*. 2023;12(12):1136-1141. <https://doi.org/10.21275/sr23906105232>
7. Dymkova S.S. Cloud-based IOT platforms and applications for optimized transport management. *REDS: Telekommunikatsionnye ustroystva i sistemy*. 2020;10(4):39-50 (In Russ.).
8. Fu Y., Zhu G., Zhu M., Xuan F. Digital twin for integration of design-manufacturing-maintenance: An overview. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2022;35:80. <https://doi.org/10.1186/s10033-022-00760-x>
9. 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;2:45-50. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-2-45-50>
10. Kostomakhin M.N., Petrishev N.A., Voronov A.N., Sayapin A.S. Experimental system of remote monitoring of technical condition of self-propelled agricultural machines. *Selskokhozyaystvennaya tekhnika: obsluzhivanie i remont*. 2019;10:48-57 (In Russ.).
11. Nikitchenko S.L., Ignatyeva O.V. Selection of system elements for remote diagnostics of the technical condition of a hydraulic drive. *Intellektualniy transport*. 2025;9(1):68-76 (In Russ.).
12. Vinogradov G.P. Model of subjectively rational decision-making with selectable descriptions of the worldview and interest structure. *Information and Mathematical Technologies in Science and Management*. 2018;2:42-51. (In Russ.).
13. Dushkin R.V., Andronov M.G. Hybrid design of artificial intelligent systems. *Kibernetika i programmirovaniye*. 2019;4:51-58. (In Russ.). <https://doi.org/10.25136/2644-5522.2019.4.29809>
14. Nikitchenko S.L., Ignatieva O.V., Lyashchenko A.M. Engineering and technical support of the agro-industrial complex in Henan province of the People's Republic of China. *Machinery Technical Service*. 2024;62(3):7-16 (In Russ.).
15. Chechet V.A., Levshin A.G., Skorokhodov A.N., Yegorov V.V. Fundamentals of systematic diagnostics of machines. *Vestnik of Federal State Educational Establishment of Higher Professional Education "Moscow State Agroengineering University named after V.P. Goryachkin"*. 2018;6:51-55 (In Russ.).
16. Nikitchenko S.L., Grinchenkov D.V. Improving the methods of reserving spare parts for agricultural machinery based on genetic algorithms. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2022;24(6):25-31 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-6-25-31>
17. Nikitchenko S.L., Zyryankina K.E. Forecasting the need for spare parts of machine hydraulic systems using a neural network. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya*. 2024;2:15-24. (In Russ.).
18. Zakharov N.S., Kozin E.S. Control of the technological process of car maintenance and repair using neural networks. *Herald of the Ural State University of Railway Transport*. 2023;4:43-51. (In Russ.).
19. Nikitchenko S.L., Lyashchenko Z.V., Glazunov D.V. Improving the organization of tractor maintenance, taking into account the annual planned operating time. *Machinery Technical Service*. 2025;63(2):22-31. (In Russ.).
20. Kokieva G.E., Gogoleva I.V., Voynash S.A., Sokolova V.A. System analysis of technological foundations of economic analysis of repair production. *Izvestiya Turskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2023;4:318-326. (In Russ.).
21. Rozenkov K.G., Fedoseev S.A. Using conditional failure probabilities in repairs scheduling. *Energosberezenie i Vodopodgotovka*. 2018;4:21-26. (In Russ.).
22. Pobedinsky V.V., Iovlev G.A., Lyakhov S.V., Goldina I.I. Neuro-fuzzy network for evaluating tractor engines residual life.

20. Кокиева Г.Е., Гоголева И.В., Войнаш С.А., Соколова В.А. Системный анализ технологических основ экономического анализа ремонтного производства // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 4. С. 318-326. EDN: POAWHD

21. Розенков К.Г., Федосеев С.А. Использование условных вероятностей отказов при планировании ремонтных мероприятий // Энергосбережение и водоподготовка. 2018. № 4 (114). С. 21-26. EDN: YMCAPZ

22. Побединский В.В., Иовлев Г.А., Ляхов С.В., Голдина И.И. Нейро-нечеткая сеть для оценки остаточного ресурса тракторных двигателей // Лесной вестник. *Forestry Bulletin*, 2022. Т. 26, № 2. С. 120-130. <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2022-2-120-130>

23. Власов Д.А., Карасев П.А., Синчуков А.В. Возможности игрового моделирования в управлении ассортиментом продукции // Статистика и Экономика. 2024. Т. 21, № 6. С. 18-29. <https://doi.org/10.21686/2500-3925-2024-6-18-29>

24. Никитченко С.Л., Липкович И.Э., Мирошников А.М., Должиков В.В. Автоматизация проектирования маршрутных технологий технического обслуживания сельскохозяйственной техники // Вестник аграрной науки Дона. 2022. Т. 15, № 2 (58). С. 39-53. EDN: AMBFJO

Информация об авторе

Сергей Леонидович Никитченко, канд. техн. наук, доцент, Ростовский государственный университет путей сообщения; 344038, Российская Федерация, Ростовская область, г. Ростов-на-Дону, площадь Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2; binom_a@rambler.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4480-9659>; Scopus Author ID: 57203408315

Статья поступила 14.02.2026, после рецензирования и доработки 24.05.2026, принята к публикации 27.05.2026

Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin. 2022;26(2):120-130. (In Russ.) <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2022-2-120-130>

23. Vlasov D.A., Karasev P.A., Sinchukov A.V. Game modeling possibilities in product assortment management. *Statistics and Economics*. 2024;21(6):18-29. (In Russ.) <https://doi.org/10.21686/2500-3925-2024-6-18-29>

24. Nikitchenko S.L., Lipkovich I.E., Miroshnikov A.M., Dolzhikov V.V. Automation of the design of route technologies for the maintenance of agricultural machinery. *Don Agrarian Science Bulletin*. 2022;15(2):39-53. (In Russ.)

Author Information

Sergei L. Nikitchenko, CSc (Eng), Associate Professor binom_a@rambler.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4480-9659>; Scopus Author ID: 57203408315
Rostov State Transport University; 2 Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya Sq., Rostov-on-Don, 344038, Russian Federation

Received 14.02.2026; Revised 24.05.2026; Accepted 27.05.2026

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.333.004.5:620.193.4

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-3-94-102>

Коррозионная активность минеральных удобрений и защитные свойства хелатного комплекса меди для сельскохозяйственной техники

С.М. Гайдар¹, С.М. Ветрова², А.С. Барчукова³^{1,2,3} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия¹ techmash@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4290-2961>² s.vetrova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0009-0004-8979-4368>³ barchukova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7202-291X>

Аннотация. Коррозия сельскохозяйственной техники при контакте с минеральными удобрениями представляет серьезную проблему, приводящую к значительным экономическим потерям и снижению ее эксплуатационных характеристик. Исследования проведены с целью проверки гипотезы об антикоррозионном защитном действии хелатного комплекса меди и его способности образовывать защитные пленки на поверхности металлов. Исследовали коррозионное воздействие на конструкционную сталь Ст3, применяемую при изготовлении элементов сельскохозяйственной техники, водных растворов минеральных удобрений: карбамида, аммиачной селитры, двух видов азотно-фосфорно-калийно-серосодержащих удобрений и микроудобрения, включающего в себя хелатный комплекс меди. Диапазон концентрации растворов 0,5...3% по массе обусловлен приближением к реальным условиям эксплуатации сельскохозяйственной техники. В качестве контрольной среды использовали дистиллированную воду. Коррозионную стойкость определяли в соответствии с ГОСТ 9.908-85. Гравиметрическим методом установлено, что аммиачная селитра проявляет наиболее высокую коррозионную активность – 1,2172...1,8937 г/м²·ч, превышающую контрольный образец в 8,5 раза, в то время как хелатный комплекс меди демонстрирует выраженные ингибирующие свойства со скоростью коррозии 0,0008...0,0019 г/м²·ч, что на 99% ниже контроля. Электрохимические исследования выполняли в потенциодинамическом режиме с использованием потенциостата Autolab PGSTAT 302N. Потенциодинамические измерения, проведенные в соответствии с ГОСТ 9.509-89, показали, что хелат меди является анодным ингибитором, смещающим потенциал коррозии в положительную сторону на 0,34...0,59 В. Подтверждена гипотеза и установлен механизм защитного действия хелата меди через образование адсорбционной пленки на поверхности стали. Для снижения коррозионной активности рабочих растворов, контактирующих с элементами сельскохозяйственной техники, предложено использовать хелат меди как бифункциональное средство (микроудобрение + ингибитор коррозии).

Ключевые слова: коррозия; коррозия сельскохозяйственной техники; коррозионная активность; сталь Ст3; удобрение; хелат меди; ингибитор коррозии; скорость коррозии

Финансирование: Работа выполнена в рамках проекта по созданию и развитию инжинирингового центра РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (соглашение № 075-15-2025-543 от 16 июня 2025 г.).

Для цитирования: Гайдар С.М., Ветрова С.М., Барчукова А.С. Коррозионная активность минеральных удобрений и защитные свойства хелатного комплекса меди для сельскохозяйственной техники // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 3. С. 94-102. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-3-94-102>

ORIGINAL ARTICLE

Corrosion activity of mineral fertilizers and protective properties of a copper chelate complex for agricultural machinery

S.M. Gaidar¹, S.M. Vetrova², A.S. Barchukova³✉

^{1,2,3} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia

¹ techmash@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4290-2961>

² s.vetrova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0009-0004-8979-4368>

³ barchukova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7202-291X>

Abstract. Corrosion of agricultural machinery exposed to mineral fertilizers represents a critical issue, leading to substantial economic losses and deterioration of operational performance. The study aimed to test the hypothesis that a copper chelate complex exhibits anticorrosion properties and is capable of forming protective films on metal surfaces. The corrosion behavior of structural steel St3, widely used in agricultural machinery components, was investigated in aqueous solutions of various mineral fertilizers, including urea, ammonium nitrate, two types of nitrogen-phosphorus-potassium sulfur-containing fertilizers, and a micronutrient fertilizer containing a copper chelate complex. The solution concentration range (0.5-3 wt%) was selected to simulate realistic operating conditions for agricultural machinery. Distilled water served as the reference medium. Corrosion resistance was evaluated in accordance with GOST 9.908-85 using the gravimetric method. The results demonstrated that ammonium nitrate exhibits the highest corrosion activity, with a corrosion rate ranging from 1.2172 to 1.8937 g/m²·h, exceeding that of the control by a factor of 8.5. In contrast, the copper chelate complex showed pronounced inhibiting properties, reducing the corrosion rate to that between 0.0008 and 0.0019 g/m²·h, which corresponds to a reduction of approximately 99% relative to the control. Electrochemical studies were performed under potentiodynamic conditions using an Autolab PGSTAT 302N potentiostat. Measurements conducted in accordance with GOST 9.509-89 revealed that the copper chelate acts as an anodic inhibitor, shifting the corrosion potential toward more positive values by 0.34-0.59 V. The hypothesis was thus confirmed, and the corrosion protection mechanism was attributed to the formation of an adsorption film on the steel surface. The use of copper chelate is proposed as a bifunctional agent – serving simultaneously as a micronutrient fertilizer and a corrosion inhibitor – to reduce the corrosion activity of working solutions in contact with agricultural machinery components.

Keywords: corrosion; agricultural machinery corrosion; corrosion activity; St3 steel; mineral fertilizers; copper chelate; corrosion inhibitor; corrosion rate

Funding. This work was carried out within the framework of the project for the establishment and development of the Engineering Center of Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Agreement No. 075-15-2025-543 dated June 16, 2025).

For citation: Gaidar S.M., Vetrova S.M., Barchukova A.S. Corrosion activity of mineral fertilizers and protective properties of a copper chelate complex for agricultural machinery. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(3):94-102. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-3-94-102>

Введение

Коррозия сельскохозяйственной техники является одной из наиболее актуальных проблем, приводящей к существенным экономическим потерям. По различным оценкам, ущерб от коррозии достигает 2,1...3,0% валового внутреннего продукта страны¹, при этом значительная доля приходится на агропромышленный комплекс. Особенностью сельскохозяйственной техники является сезонный характер эксплуатации и необходимость длительного межсезон-

ного хранения, что создает благоприятные условия для развития коррозионных процессов [1].

Минеральные удобрения, являясь основой интенсивного земледелия, одновременно представляют собой высокоагрессивные среды по отношению к металлическим конструкциям. Коррозионное воздействие удобрений обусловлено их способностью к диссоциации в водных растворах с образованием электролитов, а также наличием кислых и щелочных компонентов, изменяющих pH среды [2-4].

Аммиачная селитра (NH₄NO₃) – одно из наиболее распространенных азотных удобрений, обеспечивающих высокую эффективность питания растений. Однако данное удобрение вследствие гидролиза

¹ Романченко Н.М., Романченко Н.М. Защита сельскохозяйственной техники от коррозии: Учебное пособие. Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет, 2016. 188 с. EDN: KRWJOE.

отличается высокой коррозионной активностью с образованием азотной кислоты, разрушающей защитные оксидные пленки на стальных поверхностях [2]. Комплексные NPK-удобрения, включая серосодержащие азотно-фосфорно-калийные марки, также проявляют значительную агрессивность, особенно в кислой среде, что связано с присутствием различных солей и их взаимодействием с металлом. Карбамид (мочевина), несмотря на высокое содержание азота, демонстрирует меньшую коррозионную активность благодаря амидной форме азота и слабой электролитической диссоциации [2].

Традиционные методы защиты металлического оборудования от коррозии включают в себя применение консервационных масел и ингибиторов коррозии [5-7]. Использование перечисленных средств в агропромышленном комплексе осложняется необходимостью обеспечения экологической безопасности и сохранения качества сельскохозяйственной продукции [8]. В этой связи особый интерес представляют бифункциональные соединения, сочетающие свойства микроудобрений и ингибиторов коррозии [9].

Хелатные комплексы микроэлементов широко применяются в современном растениеводстве благодаря высокой биодоступности питательных веществ. Хелаты меди используются для корневых и некорневых подкормок различных сельскохозяйственных культур, улучшения фотосинтеза, повышения устойчивости к заболеваниям и увеличения урожайности. Медь входит в состав ключевых ферментов, участвующих в процессах дыхания (компонент цитохром-с-оксидазы), фотосинтеза (входит в состав пластоцианина) и метаболизме белков и углеводов, что делает медьсодержащие микроудобрения важным элементом технологии возделывания картофеля, зерновых и овощных культур [10, 11].

Предварительные исследования показали, что хелатные комплексы меди могут образовывать защитные пленки на поверхности металлов, что открывает перспективы их использования в качестве экологически безопасных ингибиторов коррозии [7, 9]. Механизм защитного действия связан с адсорбцией хелатных молекул на металлической поверхности и образованием координационных связей, препятствующих электрохимическим реакциям. При этом биоразлагаемость органических компонентов хелатов обеспечивает их экологическую приемлемость для применения в сельском хозяйстве.

Необходимо проверить гипотезу о защитном действии хелата меди и его способности образовывать защитные пленки на поверхности металлов

Цель исследований: оценка влияния водных растворов минеральных удобрений и хелатного

комплекса меди на скорость коррозии стали Ст3 и установление механизма защитного действия хелата меди на основе гравиметрических и электрохимических исследований.

Материалы и методы

В качестве объекта исследований использовали конструкционную сталь Ст3, широко применяемую при изготовлении элементов сельскохозяйственных машин и оборудования, контактирующих с растворами минеральных удобрений (бункеры, трубопроводы, дозирующие узлы, емкости).

Образцы для гравиметрических испытаний изготовлены в форме пластин размером $50 \times 30 \times 3$ мм с просверленными отверстиями для подвеса в соответствии с ГОСТ 9.908-85. Перед испытаниями поверхность образцов подвергали механической обработке абразивной бумагой с последовательным уменьшением зернистости (Р320, Р600, Р1000), обезжириванию этиловым спиртом и высушиванию при комнатной температуре. Массу каждого образца определяли с точностью до 0,0001 г на аналитических весах.

Для электрохимических исследований использовали пластины диаметром 16 мм с рабочей поверхностью 0,785 см². Перед измерениями поверхность шлифовали, полировали до зеркального блеска и обезжиривали ацетоном.

Исследовали 5 видов водных растворов минеральных удобрений концентрацией 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 и 3,0% по массе [2]:

1. Карбамид (мочевина, $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) – амидная форма азотного удобрения с содержанием азота 46%.

2. NPK 1 – азотно-фосфорно-калийное серосодержащее удобрение марки «NPK(S) 8-20-30 (2)» фирмы «ФОСАГРО». Содержание: азот общий – 8%; фосфаты (в пересчете на P_2O_5) – 20%; калий (в пересчете на K_2O) – 30%; массовая доля сульфатов (в пересчете на S) – 2...5%.

3. NPK 2 – азотно-фосфорно-калийное серосодержащее удобрение марки 16-16-16-6 (S) фирмы «BelFert белорусские удобрения». Содержание: азот общий – 16%; фосфаты (в пересчете на P_2O_5) – 16%; калий (в пересчете на K_2O) – 16%; массовая доля сульфатов (в пересчете на S) – 6%.

4. Аммиачная селитра (нитрат аммония, NH_4NO_3) – азотное удобрение с содержанием азота 34,4%.

5. Хелатный комплекс меди – микроудобрение, содержащее медь в хелатной форме.

Выбор диапазона концентраций минеральных удобрений 0,5...3,0% по массе обусловлен приближением к реальным условиям эксплуатации сельскохозяйственной техники. Указанные значения соответствуют разбавленным рабочим растворам,

которые могут образовываться при промывке бункеров, трубопроводов и дозирующих узлов. При этом концентрации 1...3% были использованы для гравиметрических испытаний как наиболее репрезентативные для длительного контакта металла с растворами.

В качестве контрольной среды использовали дистиллированную воду (ГОСТ 6709-72). Растворы готовили непосредственно перед началом экспериментов путем растворения точных навесок удобрений в дистиллированной воде при комнатной температуре ($20 \pm 2^\circ\text{C}$). Значение pH растворов измеряли с помощью pH-метра с точностью $\pm 0,01$.

Определение скорости коррозии выполняли гравиметрическим методом в соответствии с ГОСТ 9.908-85. Предварительно взвешенные образцы стали помещали в стеклянные сосуды объемом 400 мл, содержащие исследуемые растворы, в соотношении площади поверхности образца к объему раствора $1\text{см}^2:10\text{мл}$. Образцы подвешивали на стеклянных палочках таким образом, чтобы исключить их контакт между собой и со стенками сосуда.

Испытания проводили в статических условиях при комнатной температуре ($20 \pm 2^\circ\text{C}$) в течение 10 суток (240 ч). По завершении экспозиции образцы извлекали из растворов, промывали дистиллированной водой и удаляли продукты коррозии химическим методом путем погружения в ингибированный раствор соляной кислоты с добавлением уротропина. После тщательной промывки и высушивания образцы повторно взвешивали.

Скорость коррозии определяли по убыли массы образца:

$$K = \Delta m / (S \cdot t),$$

где K – скорость коррозии, $\text{г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; Δm – убыль массы образца, г; S – площадь поверхности образца, м^2 ; t – время испытания, ч.

Для каждого варианта опыта использовали три параллельных образца; результаты усредняли. Визуальную оценку характера коррозионных поражений выполняли до и после удаления продуктов коррозии с фотографической фиксацией.

Электрохимические исследования проводили в потенциодинамическом режиме с использованием потенциостата Autolab PGSTAT 302N с программным обеспечением Nova 2.1.5 в стандартной трехэлектродной ячейке. В качестве рабочего электрода служил исследуемый образец стали Ст3, электрода сравнения – насыщенный хлорсеребряный электрод (н.х.э.), вспомогательного электрода – платиновая пластина.

Перед снятием поляризационных кривых рабочий электрод выдерживали в исследуемом растворе в течение 5 мин до установления стационарного потенциала коррозии ($E_{\text{кор}}$). Потенциодинамические измерения выполняли в диапазоне от -250 до $+250\text{ мВ}$ относительно потенциала коррозии при скорости развертки потенциала $1...2\text{ мВ/с}$ в соответствии с ГОСТ 9.509-89. По полученным поляризационным кривым методом тафелевской экстраполяции определяли потенциал коррозии ($E_{\text{кор}}$) и плотность тока коррозии ($I_{\text{кор}}$). Характер смещения потенциала коррозии позволял установить тип ингибитора (анодный, катодный или смешанный).

Все эксперименты проводили при температуре $20 \pm 2^\circ\text{C}$ в условиях естественной аэрации растворов. Значения pH растворов контролировали в начале и по окончании экспериментов. Каждое измерение выполняли не менее трех раз; результаты статистически обрабатывались с расчетом среднего значения и стандартного отклонения.

Результаты и их обсуждение

Результаты гравиметрических испытаний представлены в таблице 1.

Таблица 1

Скорость коррозии стали Ст3 в растворах минеральных удобрений после 10 суток экспозиции

Table 1

Corrosion rate of St3 steel in mineral fertilizer solutions after 10 days of exposure

№	Раствор минерального удобрения	Концентрация раствора минерального удобрения, %					
		1,0		2,0		3,0	
		pH	Скорость коррозии, $\text{г}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$	pH	Скорость коррозии, $\text{г}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$	pH	Скорость коррозии, $\text{г}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$
1	Карбамид	7,08	0,1783	7,34	0,1841	7,38	0,1655
2	NPK 1	7,16	0,0214	7,10	0,0243	7,04	0,0312
3	NPK 2	5,35	0,1241	5,15	0,2656	5,02	0,2773
4	Аммиачная селитра	5,45	1,2172	5,40	1,4976	5,27	1,8937
5	Хелатный комплекс меди	10,48	0,0008	10,53	0,0019	10,59	0,0013

Примечание. В качестве контроля использовали дистиллированную воду pH = 6,34. Скорость коррозии в контроле составила $0,1439\text{ г}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$.

Анализ данных показал, что наибольшей коррозионной активностью обладает аммиачная селитра: в 1%-ном растворе скорость коррозии стали составила $1,2172 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, что в 8,5 раза превышает контрольное значение, в 3%-ном растворе скорость коррозии возрастает до $1,8937 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$. Это связано с гидролизом NH_4NO_3 с образованием азотной кислоты и, соответственно, со снижением pH раствора с 5,45 до 5,27, с повышением электропроводности вследствие полной диссоциации соли, способности аммиака образовывать растворимые комплексы с ионами железа, препятствующие формированию устойчивых пассивных пленок.

Визуальный осмотр образцов после экспозиции в растворах аммиачной селитры (рис. 1) показал интенсивное образование рыхлых продуктов коррозии красно-бурого цвета, характерных для гидроксидов и оксидов железа. После удаления коррозионных наслоений наблюдали следы повреждения поверхности образцов, что свидетельствует о развитии общей равномерной коррозии.

Азотно-фосфорно-калийное удобрение NPK 2 характеризуется нелинейным ростом коррозионной активности: при увеличении концентрации раствора от 1 до 2% скорость коррозии возрастает более чем в два раза, тогда как дальнейшее увеличение до 3% приводит лишь к небольшому приросту. Такой характер объясняется частичным экранированием поверхности солевыми отложениями при высоких концентрациях, что ограничивает доступ агрессивной среды к металлу.

NPK 1 при значениях pH, близких к нейтральным (около 7,0...7,2), проявляет значительно меньшую коррозионную активность, чем NPK 2, что свидетельствует о важной роли кислотности и состава анионов в формировании агрессивности раствора.

Карбамид, несмотря на высокое содержание азота, оказывает умеренное коррозионное воздействие, сопоставимое с контролем. Близкие к нейтральным значениям pH и слабая электролитическая диссоциация обуславливают умеренное коррозионное воздействие на сталь Ст3. С ростом концентрации карбамида от 2 до 3% наблюдается незначительное снижение скорости коррозии стали Ст3. Данная особенность связана с формированием на поверхности образцов более плотного слоя продуктов коррозии, частично экранирующих металл от раствора.

Хелатный комплекс меди показал выраженные ингибирующие свойства. Скорость коррозии стали в его растворе составила $0,0008...0,0019 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, что соответствует лишь 0,6...1,3% от контрольного значения. Эффективность ингибирования достигает 98,7...99,4%. Щелочное значение pH (10,48...10,59)

способствует пассивации, однако основной вклад в защиту вносит формирование хелатной защитной пленки на поверхности металла.

Механизм защитного действия хелатного комплекса меди заключается в адсорбции его молекул на поверхности стали с образованием координационных связей между атомами железа и функциональными группами хелатирующего состава. Образующаяся мономолекулярная пленка обладает гидрофобными свойствами, препятствуя доступу воды и кислорода к металлической поверхности.

Визуальный осмотр образцов стали после экспозиции в растворе хелатного комплекса меди (рис. 2) показал отсутствие видимых коррозионных поражений, сохранение металлического блеска и образование тонкой равномерной пленки голубоватого оттенка, характерной для соединений меди. Поверхность оставалась гладкой и без признаков коррозии.

В контроле – экспозиция в дистиллированной воде (рис. 3) – также происходит формирование

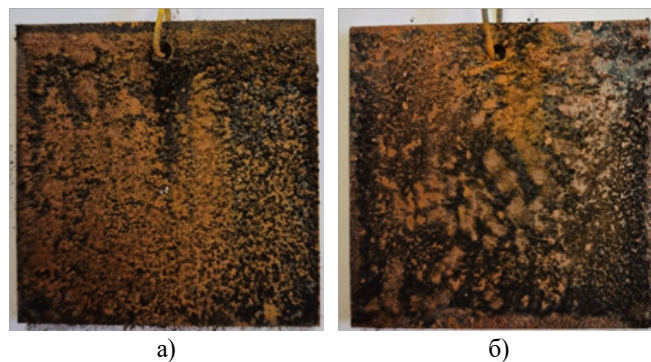


Рис. 1. Вид образца после экспозиции в растворе аммиачной селитры:
а) правая сторона; б) левая сторона

Fig. 1. Appearance of the sample after exposure in ammonium nitrate solution:
a) right side; b) left side

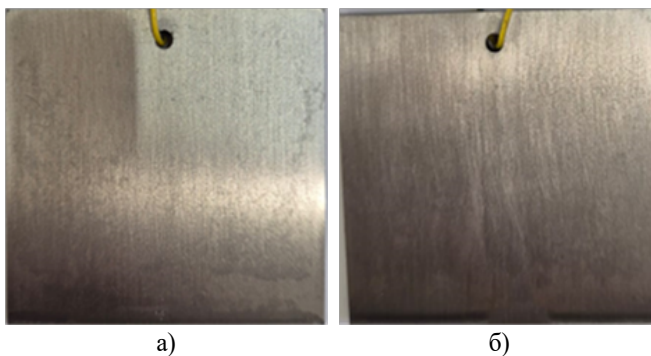


Рис. 2. Вид образца после экспозиции в растворе хелатного комплекса меди:
а) правая сторона; б) левая сторона

Fig. 2. Appearance of the sample after exposure in copper chelate complex solution:
a) right side; b) left side

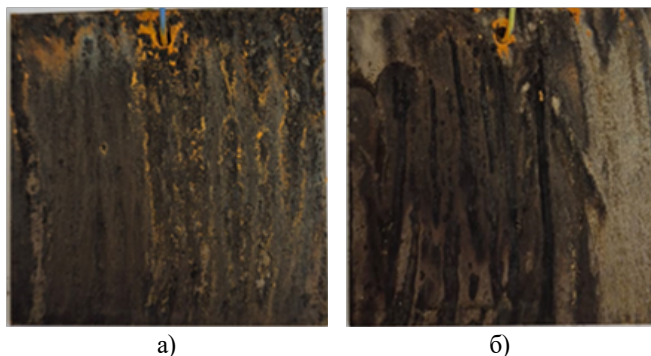


Рис. 3. Вид образца после экспозиции в воде (контрольный образец): а) правая сторона; б) левая сторона

Fig. 3. Appearance of the sample after exposure in water (control sample): а) right side; б) left side

продуктов коррозии, хотя и в значительно меньшей степени, чем в агрессивных средах минеральных удобрений.

Результаты потенциодинамических измерений основных растворов минеральных удобрений и хелата меди концентрацией 0,5; 1,5 и 3,0% представлены в таблице 2.

Анализ поляризационных кривых показал, что минеральные удобрения существенно изменяют электрохимическое поведение стали Ст3. По сравнению с дистиллированной водой аммиачная селитра смещает потенциал коррозии в отрицательную сторону (до $-0,62651$ В), что свидетельствует об активизации анодного растворения железа. С ростом концентрации раствора аммиачной селитры плотность тока коррозии увеличивается от $338 \cdot 10^{-8}$ до $1460 \cdot 10^{-8}$ А, что подтверждает высокую коррозионную активность данного удобрения.

С ростом концентрации NPK 2 ток коррозии увеличивается от $466 \cdot 10^{-8}$ до $1650 \cdot 10^{-8}$ А. По сравнению с дистиллированной водой потенциал коррозии

смещен в отрицательную область (до $-0,69646$ В), причем это смещение более выражено, чем у аммиачной селитры, несмотря на несколько больший ток коррозии. Это указывает на активизацию анодного процесса при одновременном торможении катодной реакции вследствие многокомпонентного состава удобрения.

Раствор NPK 1 характеризуется средними значениями тока коррозии в диапазоне $148 \cdot 10^{-8} \dots 881 \cdot 10^{-8}$ А. Отрицательное смещение потенциала коррозии (от $-0,69848$ до $-0,73222$ В) при относительно умеренном токе коррозии свидетельствует о сложном многокомпонентном составе раствора, влияющем на кинетику как анодных, так и катодных процессов.

Карбамид характеризуется низкими значениями тока коррозии ($19,3 \cdot 10^{-8} \dots 22,9 \cdot 10^{-8}$ А), что коррелирует с результатами гравиметрических испытаний. Диапазон потенциала коррозии ($-0,36822 \dots -0,45191$ В) близок значению дистиллированной воды, что подтверждает слабую электролитическую природу карбамида и его низкую коррозионную активность.

Хелатный комплекс меди проявляет электрохимическое поведение, отличающееся от всех других исследованных сред. Потенциал коррозии смещается в положительную сторону (от $-0,11265$ до $-0,15184$ В), что на $0,26 \dots 0,30$ В является более положительным, чем в дистиллированной воде, и на $0,34 \dots 0,59$ В более положительным, чем в растворах других удобрений. Это является характерным признаком анодного ингибитора, переводящего металл в область пассивации.

Плотность тока коррозии в присутствии хелатного комплексного меди низка ($4,39 \cdot 10^{-8} \dots 15,4 \cdot 10^{-8}$ А), что ниже и сопоставимо с контрольным значением в дистиллированной воде ($18,44 \cdot 10^{-8}$ А). При концентрации 0,5% достигается минимальное значение тока

Таблица 2

Результаты потенциодинамического исследования растворов минеральных удобрений

Table 2

Results of the potentiodynamic study of mineral fertilizer solutions

Название	Концентрация раствора минеральных удобрений, %					
	0,5		1,5		3,0	
	$-E_{кор}$, В	$I_{кор} \cdot 10^{-8}$, А	$-E_{кор}$, В	$I_{кор} \cdot 10^{-8}$, А	$-E_{кор}$, В	$I_{кор} \cdot 10^{-8}$, А
Аммиачная селитра	$-0,62651$	338	$-0,60925$	430	$-0,58268$	1460
Карбамид	$-0,45191$	22,9	$-0,36822$	17,7	$-0,36887$	19,3
Хелатный комплекс меди	$-0,11265$	4,39	$-0,13808$	5,07	$-0,15184$	15,4
NPK 1	$-0,69848$	148	$-0,73222$	527	$-0,72815$	881
NPK 2	$-0,69646$	466	$-0,68764$	638	$-0,68079$	1650

Примечание. В контроле (дистиллированной воде) потенциал коррозии достиг $E_{кор} = -0,41505$ В, плотность тока коррозии составила $I_{кор} = 18,44 \cdot 10^{-8}$ А.

коррозии ($4,39 \cdot 10^{-8}$ А), что соответствует эффективности ингибирования 76% по сравнению с контролем. При увеличении концентрации до 3,0% плотность тока коррозии возрастает до $15,4 \cdot 10^{-8}$ А, однако остается значительно ниже, чем в среде других удобрений.

Анализ формы поляризационных кривых (рис. 4) показывает, что в присутствии хелатного комплекса меди наблюдается существенное торможение анодной реакции растворения железа (уменьшение наклона анодной ветви) при умеренном ускорении катодной реакции восстановления кислорода. Положительное смещение потенциала коррозии в сочетании с преимущественным торможением анодного процесса характеризует хелатный комплекс меди как ингибитор анодного типа.

Механизм анодного ингибирования заключается в адсорбции молекул хелата на анодных участках поверхности стали с образованием защитного слоя, препятствующего переходу ионов железа в раствор.

Важным фактором дополнительной защиты является высокое щелочное значение pH растворов хелатного комплекса меди (10,48...10,59). В таких условиях на поверхности стали формируется пассивная оксидно-гидроксидная пленка, состоящая преимущественно из соединений железа (III) (Fe_2O_3 , $\text{Fe}(\text{OH})_3$ и др.). Синергетический эффект щелочной среды и адсорбции хелатных молекул обеспечивает более высокую степень защиты, чем могла бы дать одна лишь щелочность.

Практическая значимость применения хелата меди в растениеводстве связана с его использованием в качестве эффективного микроудобрения. Применение хелатов меди при возделывании картофеля обеспечивает повышение урожайности на 6,2...15,6%, улучшение товарности клубней на 1,8...3,4% [11].

Хелатная форма меди характеризуется более высокой биодоступностью по сравнению с неорганическими солями (сульфатом и хлоридом меди), в ряде случаев обеспечивая в несколько раз более

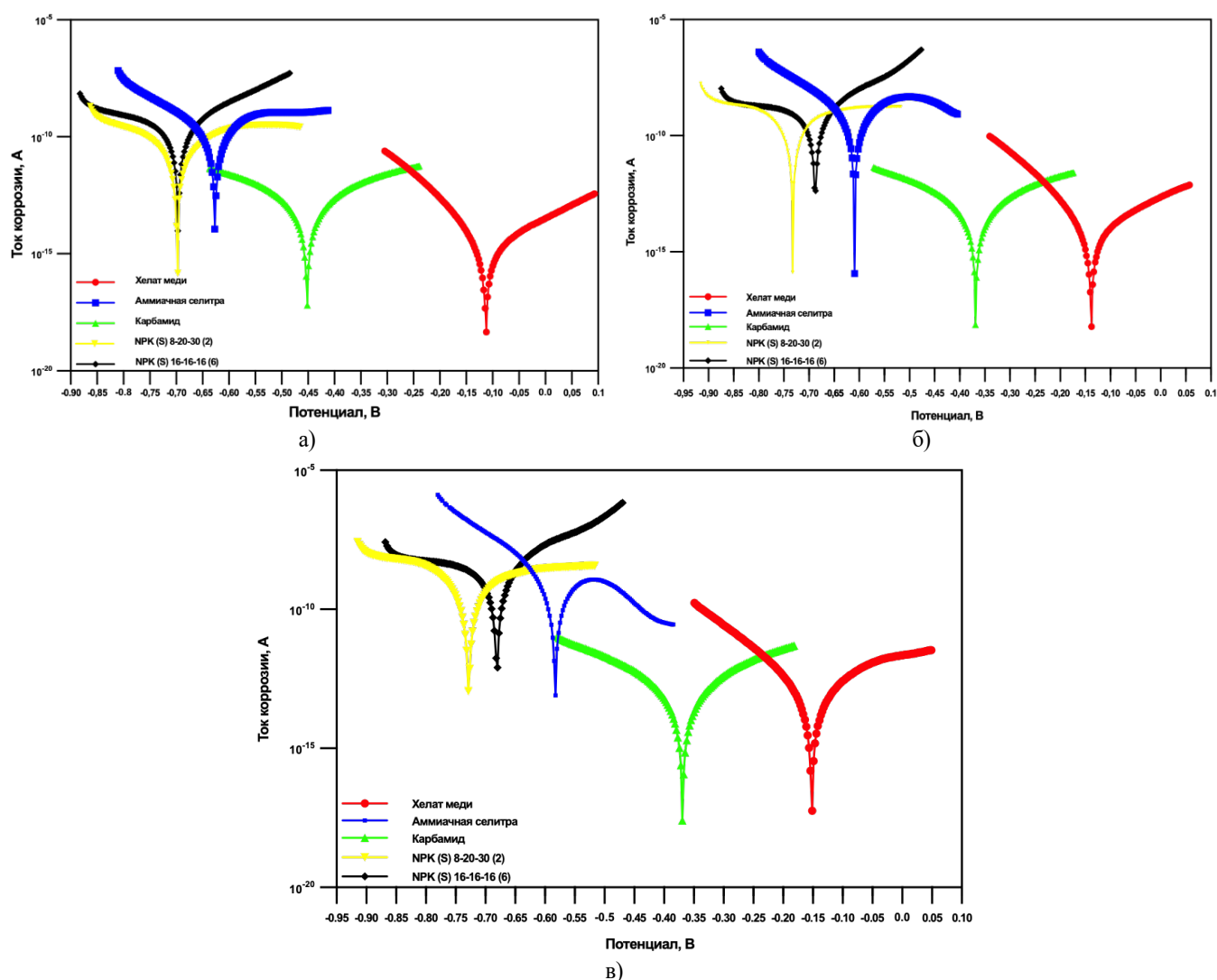


Рис. 4. Поляризационные кривые стали Ст3 при концентрации растворов удобрений 0,5% (а), 1,5% (б) и 3,0% (в)

Fig. 4. Polarization curves of St3 steel at fertilizer solution concentrations of 0.5% (a), 1.5% (b), and 3.0% (c)

эффективное усвоение элементарной меди растениями. С учетом выявленных ингибирующих свойств хелатный комплекс меди может рассматриваться как потенциальный компонент технологических растворов, совмещающих функции питания растений и снижения коррозионной активности среды по отношению к конструкционной стали.

Таким образом проведенные исследования показывают, что хелатный комплекс меди обладает уникальным сочетанием свойств, делающим его перспективным бифункциональным средством для применения в сельском хозяйстве.

Выводы

1. Коррозионная активность минеральных удобрений по отношению к стали Ст3 различается: аммиачная селитра характеризуется максимальной агрессивностью; удобрение NPK 2 занимает промежуточное положение; NPK 1 и карбамид оказывают меньшее коррозионное воздействие.

2. Раствор аммиачной селитры концентрацией 1...3% отличается наивысшей скоростью коррозии стали Ст3 1,2172...1,8937 г/м²·ч, что в 8,5 раза выше значения контрольного образца в дистиллированной

воде. Это можно объяснить гидролизом соли с образованием азотной кислоты, полной электролитической диссоциацией и высокой электропроводностью раствора.

3. Хелатный комплекс меди продемонстрировал выраженные ингибирующие свойства. Скорость коррозии стали Ст3 составила 0,0008...0,0019 г/м²·ч (0,6...1,3%). Эффективность ингибирования достигает 99%.

4. Потенциодинамические исследования показали, что хелатный комплекс меди является ингибитором анодного типа: потенциал коррозии смещается в положительную сторону на 0,34...0,59 В; плотность тока коррозии снижается до 4,39...15,4·10⁻⁸ А.

5. Механизм защитного действия хелатного комплекса меди связан с адсорбцией хелатных молекул на поверхности стали и формированием координационно закрепленного защитного слоя. В щелочной среде раствора это приводит к пассивации стали и уменьшению скорости коррозии.

6. Хелат меди, замедляющий процесс коррозии, можно добавлять в рабочие растворы при межсезонной промывке, заполнении бункеров и трубопроводов сельскохозяйственных машин.

Список источников

1. Кузнецов Р.А., Дробышев И.А., Бахареv А.А. Анализ применяемых способов и средств для консервации транспортно-технологических машин // Наука и образование. 2022. Т. 5, № 2. С. 220. EDN: KDCEUF
2. Барчукова А.С., Ветрова С.М., Илюшкова Е.М. Исследование скорости коррозии стали Ст3 в среде минеральных удобрений // АгроЭкоИнфо. 2024. № 6 (66). С. 45. EDN: INBHSS
3. Горностаева Г.Е., Редькина Г.В., Кузнецов Ю.И. Ингибирование коррозии низкоуглеродистой стали в растворах сульфата аммония // Успехи в химии и химической технологии. 2023. Т. 37, № 2 (264). С. 33-35. EDN: DRGSYU
4. Fachikov L., Ionova D., Tzaneva B. Corrosion of low-carbon steels in aqueous solutions of ammonium sulfate mineral fertilizer. *Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy*. 2006;41(1):21-24. <https://journal.uctm.edu/node/j2006-1/03-Fachikov-str-21-24.pdf>
5. Успенский И.А., Фадеев И.В., Пестряева Л.Ш. и др. Новые ингибиторы коррозии для защиты сельскохозяйственной техники // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2020. № 3. С. 365-376. EDN: UMMBAX
6. Жаксыбаева А.Г., Хамитова А.С. Ингибиторы коррозии для сохранения металлических изделий // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2014. № 12-1. С. 23-26. EDN: TFGLCV
7. Барчукова А.С., Ветрова С.М. Исследование противокоррозионных свойств водорастворимого ингибитора // Вестник Чувашского государственного аграрного университета. 2025. № 3. С. 159-163. EDN: LHQNVR
8. Ушаков И.А., Никонова В.С., Полинский И.В. и др. Исследование эффективности ингибиторов коррозии на основе производных изотиуруниевых солей // Известия

References

1. Kuznetsov R.A., Drobyshev I.A., Bakharev A.A. Analysis of the applied methods and means for preservation of transport and technological machines. *Nauka i obrazovanie*. 2022;5(2):220. (In Russ.).
2. Barchukova A.S., Vetrova S.M., Ilyushkova E.M. Study of steel corrosion ST3 rate in mineral fertilizer environment. *AgroEkoInfo*. 2024;6:45. (In Russ.).
3. Gornostaeva G.E., Redkina G.V., Kuznetsov Yu.I. Corrosion inhibition of mild steel in ammonium sulfate solutions. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii*. 2023;37(2):33-35. (In Russ.).
4. Fachikov L., Ionova D., Tzaneva B. Corrosion of low-carbon steels in aqueous solutions of ammonium sulfate mineral fertilizer. *Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy*. 2006;41(1):21-24. <https://journal.uctm.edu/node/j2006-1/03-Fachikov-str-21-24.pdf>
5. Uspensky I.A., Fadeev I.V., Pestrjaeva L.Sh. et al. New corrosion inhibitors for the protection of agricultural machinery. *Proceedings of Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Education*. 2020;3:365-376. (In Russ.).
6. Zhaksybaeva A.G., Khamitova A.S. Corrosion inhibitors for preservation of metal products. *Aktualnye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk*. 2014;12-1:23-26. (In Russ.).
7. Barchukova A.S., Vetrova S.M. Investigation of anticorrosive properties of a water-soluble inhibitor. *Vestnik Chuvash State Agrarian University*. 2025;3:159-163. (In Russ.).
8. Ushakov I.A., Nikonova V.S., Polynskii I.V. et al. Study on efficiency of corrosion inhibitors based on derivatives of isothiuronc salts. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2021;11(2):326-332. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2021-11-2-326-332>
9. Barchukov A.S., Vetrova S.M., Lapsar O.M., Pikina A.M. Anticorrosive properties of the BORAM fertilizer and its effect on the potato yield. *Agricultural*

вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2021. Т. 11, № 2. С. 326-332. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2021-11-2-326-332>

9. Барчукова А.С., Ветрова С.М., Лапсарь О.М., Пикина А.М. Антикоррозийные свойства удобрения БОРАМ и его влияние на урожайность картофеля // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 4. С. 61-67. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-4-61-67>

10. Кузнецов Д.А., Прокина Л.Н., Ибрагимова Г.Н., Калинина А.Д. Влияние хелатной формы микроудобрения (микровит) на фоне применения высоких доз минеральных удобрений на урожайность сортов картофеля ранней группы спелости // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2017. № 1. С. 40-47. EDN: XVRTYF

11. Барчукова А.С., Ветрова С.М. Эффективность применения хелатного комплекса меди при возделывании картофеля // АгроЭкоИнженерия. 2025. № 2. С. 27-38. EDN: YIMYVQ

Информация об авторах

¹ Гайдар Сергей Михайлович, д-р техн. наук, профессор;
<https://orcid.org/0000-0003-4290-2961>;

techmash@rgau-msha.ru; SPIN-код: 6714-3698

² Ветрова Софья Михайловна, канд. техн. наук, доцент;
<https://orcid.org/0009-0004-8979-4368>;

s.vetrova@rgau-msha.ru; SPIN-код: 2176-3945

³ Барчукова Алина Сергеевна, канд. техн. наук, доцент;
<https://orcid.org/0000-0001-7202-291X>;

barchukova@rgau-msha.ru; SPIN-код: 2129-7541

^{1,2,3} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, Тимирязевская ул., 49

Вклад авторов

С.М. Гайдар – концептуализация, руководство исследованиями, методология;

С.М. Ветрова – формальный анализ, создание черновика рукописи, визуализация;

А.С. Барчукова – проведение исследований; ресурсы, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование.

Статья поступила 07.01.2026, после рецензирования и доработки 27.04.2026, принята к публикации 14.05.2026

Engineering (Moscow). 2025;27(4):61-67. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-4-61-67>

10. Kuznetsov D.A., Prokina L.N., Ibragimova G.N., Kalinina A.D. Influence of chelate microfertilizers (microfit) application on the yield of early ripening group potato varieties on background of high doses of mineral fertilizers. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2017;1:40-47. (In Russ.).

11. Barchukova A.S., Vetrova S.M. Efficiency of applying copper chelate complex in potato growing. *AgroEkoInzheneriya*. 2025;(2):27-38. (In Russ.).

Author Information

Sergey M. Gaidar¹, DSc (Eng), Professor,

techmash@rgau-msha.ru;

<https://orcid.org/0000-0003-4290-2961>;

ScopusAuthorID: 57191589797; ResearcherID: I-4723-2018

Sofya M. Vetrova², CSc (Eng); s.vetrova@rgau-msha.ru;

<https://orcid.org/0009-0004-8979-4368>

Alina S. Barchukova³, CSc (Eng); barchukova@rgau-msha.ru✉;

<https://orcid.org/0000-0001-7202-291X>

^{1,2,3} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 49 Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation

Author Contribution

S.M. Gaidar – conceptualization, research supervision, methodology; S.M. Vetrova – formal analysis, writing – original draft, visualization; A.S. Barchukova – investigation, resources, writing – review and editing of the manuscript.

Received 07.01.2026; Revised 27.04.2026; Accepted 14.05.2026

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.713.3

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-3-103-110>

Проектирование комплексных калибров для контроля деталей шпоночных соединений при ремонте редукторов

О.А. Леонов¹, Н.Ж. Шкаруба², Д.А. Пупкова³✉, Л.А. Гринченко⁴, А.В. Чепурин⁵, В.О. Леонов⁶

^{1, 2, 3, 4, 5} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия

¹ oaleonov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8469-8052>

² shkaruba@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2770-8442>

³ bogolyubova@rgau-msha.ru✉; <https://orcid.org/0000-0002-0273-2796>

⁴ grinchenko@rgau-msha.ru

⁵ av.tchepurin@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4699-4541>

⁶ oaleonov@yandex.ru

Аннотация. Преимуществом применения комплексных калибров при контроле геометрических параметров деталей шпоночных соединений является значительное снижение трудоемкости контроля. Основной сложностью применения комплексных калибров является необходимость проектирования набора, состоящего из комплексных калибра-пробки и калибра-призмы, с учетом нормируемых значений контролируемых параметров данного соединения, а также регулярное их воспроизводство по мере износа. Цель исследований – спроектировать набор комплексных калибров для контроля размеров и геометрических параметров вала со шпоночным пазом и отверстия муфты со шпоночным пазом, обеспечивающих собираемость соединения вала с цепной муфтой, установленных на универсальном редукторе Н 090.40.000 завода Моссельмаш. В качестве теоретической основы исследований и разработки послужили нормативные документы, регламентирующие требования к допускам контролируемых параметров и размерам комплексных калибров. Методология базируется на комплексном подходе включая анализ технической документации, расчетно-теоретические методы и проектирование конструкций калибров. В результате произведенных расчетов установлено, что толщина контрольной шпонки в калибре-пробке и калибре-призме с учетом допуска на изготовление составит $13,995_{-0,005}^+$. Размер калибра-пробки для контроля наименьшего внутреннего размера муфты – $49,995_{-0,004}^+$. Размер проходного калибра-пробки с учетом высоты контрольной шпонки – $53,5_{-0,25}^+$. Установлено, что наименьший предельный размер толщины контрольной шпонки калибра-пробки и калибра-призмы составляет 13,985 мм. Наименьший предельный размер диаметра изношенного калибра-пробки – 49,982 мм. Контроль при поверке (калибровке) установленных размеров калибра-пробки и калибра-призмы, находящихся в эксплуатации, позволит своевременно выявить их износ. Применение спроектированного набора комплексных калибров обеспечит высокую точность контроля и надежность оценки собираемости шпоночного соединения вала редуктора с цепной муфтой. Результаты данной работы могут использоваться в машиностроении при техническом контроле шпоночных соединений.

Ключевые слова: калибр; комплексные калибры; калибр-пробка; калибр-призма; контроль; шпоночное соединение; проектирование комплексных калибров

Финансирование. Работа выполнена в рамках проекта по созданию и развитию инжинирингового центра РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (соглашение № 075-15-2025-543 от 16 июня 2025 г.).

Для цитирования: Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Пупкова Д.А., Гринченко Л.А., Чепурин А.В., Леонов В.О. Проектирование комплексных калибров для контроля деталей шпоночных соединений при ремонте редукторов // *Агроинженерия*. 2026. Т. 28, № 3. С. 103-110. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-3-103-110>

ORIGINAL ARTICLE

Designing complex gauges for inspection of keyway joint parts when repairing reduction gears

O.A. Leonov¹, N.Zh. Shkaruba², D.A. Pupkova^{3✉}, L.A. Grinchenko⁴, A.V. Chepurin⁵, V.O. Leonov⁶

^{1,2,3,4,5,6} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia

¹ oaleonov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8469-8052>

² shkaruba@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2770-8442>

³ bogolyubova@rgau-msha.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-0273-2796>

⁴ grinchenko@rgau-msha.ru

⁵ av.tchepurin@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4699-4541>

⁶ oaleonov@yandex.ru

Abstract. A significant advantage of using complex gauges for inspecting the geometric parameters of keyway joint components is the substantial reduction in inspection labor intensity. However, the primary challenge in their application lies in designing a set comprising a complex plug gauge and a prism gauge, accounting for the standardized values of the controlled parameters of the joint, as well as ensuring their regular reproduction as wear occurs. The study aimed to design a set of complex gauges for inspecting the dimensions and geometric parameters of a shaft with a keyway and a coupling bore with a keyway. The gauges were required to ensure the assemblability of the shaft connection with a chain coupling installed on the universal reduction gear N090.40.000 manufactured by the *Mosselmash* plant. The theoretical foundation of the research included regulatory documents governing tolerance requirements for the controlled parameters and the dimensions of complex gauges. The methodology employed an integrated approach that included analysis of technical documentation, computational and theoretical methods, and gauge design. The calculations established that, with manufacturing tolerance taken into account, the thickness of the control key in both the plug gauge and the prism gauge is $13.995^{-0.005}$ mm. The plug gauge for controlling the minimum internal dimension of the coupling measures $49.995^{-0.04}$ mm. The go plug gauge, accounting for the height of the control key, measures $53.5^{-0.25}$ mm. For controlling the limit dimensions of worn gauges, the minimum limit size of the control key thickness for both the plug gauge and the prism gauge is 13.985 mm, while the minimum limit size of the diameter of the worn plug gauge is 49.982 mm. Inspection during verification (calibration) of the established dimensions of the plug gauge and the prism gauge in service will timely detect their wear. The use of the designed set of complex gauges will ensure high measurement accuracy and reliable assessment of the assemblability of the keyway joint between the reduction gear shaft and the chain coupling. The study results are applicable in mechanical engineering for the technical inspection of keyway joints.

Keywords: gauge; complex gauges; plug gauge; prism gauge; inspection; keyway joint; design of complex gauges

Funding. This work was carried out within the framework of the project for the establishment and development of the Engineering Center of Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Agreement No. 075-15-2025-543 dated June 16, 2025).

For citation: Leonov O.A., Shkaruba N.Zh., Pupkova D.A., Grinchenko L.A., Chepurin A.V., Leonov V.O. Designing complex gauges for inspection of keyway joint parts when repairing reduction gears. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(3):103-110. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-3-103-110>

Введение

Повышение энергоемкости техники наравне с зарубежными аналогами [1, 2] и улучшение качества выпускаемой продукции [3, 4] являются актуальными для отечественного сельскохозяйственного машиностроения. Помимо грамотного выбора материалов и термических операций [5], необходимы подбор пар по коэффициенту трения и моделирование шероховатости поверхности [6], расчет зазоров, допусков

и посадок, обеспечение требований точности [7]. Чтобы гарантировать точность соединений, одних расчетов недостаточно – требуется проведение контрольных операций [8-10].

В ремонтном производстве и машиностроении для контроля размеров деталей применяются, как правило, универсальные средства измерений [11, 12] и калибры [13, 14]. Применение калибров имеет ряд преимуществ и недостатков по сравнению

с универсальными средствами измерений. Особенно калибры незаменимы для проверки размеров деталей, образующих резьбовые, шлицевые и шпоночные соединения [15, 16], так как универсальными средствами измерений – например, штангенциркулями, измерять эти размеры будет неудобно. Кроме того, применение калибров гарантирует собираемость соединений [17, 18]: например, если проходная сторона калибр-пробки вошла в отверстие, а вал свободно проходит через проходную сторону калибра-скобы, то эти детали точно образуют соединение на сборке. Еще одним преимуществом использования калибров являются относительно небольшие затраты на изготовление (приобретение), так как калибры, как правило, изготавливаются силами самого предприятия. В сфере эксплуатации экономия достигается за счет повышения производительности труда контролера, так как калибры позволяют мгновенно определить, является ли годной деталь, в отличие от универсальных средств измерений, при использовании которых необходимо время на настройку прибора и считывание показаний.

Основным недостатком использования калибров является ограниченное применение. Особенно это относится к поэлементным калибрам-пробкам, так как каждый такой калибр рассчитывается и изготавливается под один контролируемый размер, в то время как универсальные средства измерений могут контролировать размеры деталей в широком диапазоне. Отметим, что в современных исследованиях [13, 16, 18] предлагаются различные варианты конструкций регулируемых калибров. Недостатками этих вариантов являются удорожание изготовления ввиду сложности конструкции и меньшая точность по отношению к классическому исполнению.

Для одновременного контроля нескольких параметров применяются комплексные калибры. Все вышеперечисленные преимущества применения поэлементных калибров относятся и к комплексным калибрам. Поскольку при использовании комплексного калибра контролируются не только предельные размеры, но и отклонения формы и расположения поверхностей, их применение в большей степени гарантирует собираемость соединений. Для обеспечения гарантий собираемости соединений необходимо одновременно проектировать и совместно применять комплексные калибры как для контроля отверстия, так и для контроля вала.

Цель исследований: спроектировать набор комплексных калибров для контроля размеров

и геометрических параметров вала со шпоночным пазом и отверстия муфты со шпоночным пазом, обеспечивающих собираемость соединения вала с цепной муфтой, установленных на универсальном редукторе Н 090.40.000 завода Моссельмаш.

Материалы и методы

В рамках исследований применены методы проектирования комплексных калибров для контроля шпоночных соединений в сельскохозяйственной технике. В качестве теоретической основы послужили нормативные документы, регламентирующие требования к допускам контролируемых параметров и размерам комплексных калибров. Методология базируется на комплексном подходе включая анализ технической документации, расчетно-теоретические методы и проектирование конструкций калибров.

Объект исследований – широко применяемое в сельскохозяйственной технике шпоночное соединение с цепной муфтой типа $\varnothing 50H8/h9$.

Предмет исследований – методика проектирования комплексных калибров.

Результаты и их обсуждение

Для соединений валов с цепными муфтами $\varnothing 50H8/h9$, установленных на универсальном редукторе Н 090.40.000 завода Моссельмаш, произведены расчеты исполнительных размеров комплексных калибров:

- калибр-пробка для одновременного контроля диаметра отверстия муфты $\varnothing 50H8^{(+0,039)}$ и ширины шпоночного паза в муфте $\varnothing 14H9^{(+0,043)}$;

- калибр-призма для контроля ширины шпоночного паза на валу $\varnothing 14H9^{(+0,043)}$. Кроме того, калибр-призма контролирует симметричность шпоночного паза (насколько точно паз расположен относительно диаметральной плоскости вала), высоту (глубину) шпоночного паза (расстояние от поверхности паза до образующей вала), параллельность шпоночного паза (параллельность сторон паза относительно оси вала).

Шпоночное соединение вала с цепной муфтой можно считать сложным, поэтому для проектирования комплекта комплексных калибров необходимо учитывать различные параметры (табл. 1).

При использовании данных, представленных в таблице 1, были произведены расчеты предельных размеров калибра-пробки и калибра-призмы. Расчеты произведены согласно ГОСТ 24109-80 «Калибры для шпоночных соединений» и ГОСТ 24853-81 «Калибры гладкие для размеров

Таблица 1

Параметры, определяющие поля допуска комплексных калибров для соединений валов с цепными муфтами Ø50H8/h9

Table 1

Critical parameters that determine the tolerance fields of complex gauges used to verify shaft connections with chain couplings (nominal size Ø50H8/h9)

Параметры	Значение, мм
Калибр-пробка для диаметра отверстия муфты Ø50H8	
Номинальный внутренний диаметр отверстия муфты, d	50
Наименьший диаметр отверстия муфты, $d_{\min}$	50
Глубина паза вала, t_1	5,5
Отклонение середины поля допуска на изготовление проходного калибра для отверстия относительно наименьшего предельного размера, Z	0,006
Допуск на изготовление калибров для отверстия муфты, H	0,004
Калибр-пробка для контроля ширины шпоночного паза 14H9	
Номинальная ширина паза вала, b	14
Наименьшая ширина шпоночного паза, $b_{\min}$	14
Высота шпонки, h	9
Расстояние от середины поля допуска на изготовление калибра-пробки до наименьшего предельного размера вала, Z_b	0,0075
Допуск на изготовление калибра-пробки по толщине шпонки, H_b	0,005
Допустимый выход изношенного размера калибра-пробки за границу поля допуска размера паза, y_b	0,015
Допуск симметричности контрольной шпонки калибра-пробки, T_s	0,020
Калибр-призма для контроля ширины шпоночного паза 14H9	
Номинальная ширина паза вала, b	14
Наименьшая ширина шпоночного паза, $b_{\min}$	14
Высота шпонки, h	9
Допуск на изготовление калибра-пробки по толщине шпонки, H_b	0,005
Допустимый выход изношенного размера калибра-пробки за границу поля допуска размера паза, y_b	0,015
Допуск симметричности контрольной шпонки калибра-призмы, T_s	0,008
Допустимый выход размера, изношенного проходного поэлементного калибра для отверстия за границу поля допуска, y	0,005

Таблица 2

Проектирование калибра-пробки и калибра-призмы для ширины паза под шпонку 14H9 и внутреннего диаметра Ø50H8

Table 2

Design of a plug gauge and a prism gauge for a keyway width of 14H9 and an internal diameter of Ø50H8

Определяе-мый размер	Новый калибр			
	номинальные размеры		предельные отклонения	
	формула	расчет, мм	обозначение	расчет, мм
Толщина контрольной шпонки калибра-пробки и калибра-призмы, b_k	$b_k = b_{\min} - Z_b + \frac{H_b}{2}$	$14 - 0,0075 + \frac{0,005}{2} = 13,995$	H_b	-0,005
Диаметр калибра-пробки, d_k	$d_k = d_{\min} - y$	$50 - 0,005 = 49,995$	H	-0,004
Размер калибра-пробки с контрольной шпонкой, H_k	$H_k = d - t_1 + h$	$50 - 5,5 + 9 = 53,5$	$h12$	-0,250
Величина, определяющая глубину вхождения шпоночной калибра-призмы в шпоночный паз вала, C	$C = \frac{d}{2} - t_1 + r$	$\frac{50}{2} - 5,5 + 0,25 = 19,75$	$js12$	$\pm 0,125$

до 500 мм. Допуски». Результаты расчетов представлены в таблице 2.

Из произведенных расчетов (табл. 2) установлено, что для контроля наименьшей ширины шпоночного паза $14^{+0,043}$ толщина контрольной шпонки, установленной в калибре-пробке и калибре-призме, с учетом допуска на изготовление составит $13,995_{-0,005}$. Размер калибра-пробки для контроля наименьшего внутреннего размера муфты $\varnothing 50^{+0,039}$ составляет $49,995_{-0,004}$. Размер проходной калибра-пробки с учетом высоты контрольной шпонки – $53,5_{-0,25}$.

В процессе эксплуатации проходные калибры изнашиваются, в результате чего возникают ошибки контроля. Поэтому необходимо установить предельно допускаемые размеры для изношенных калибров. По достижении установленных предельных размеров калибры должны быть изъяты из эксплуатации.

Из данных таблицы 3 следует, что наименьший предельный размер толщины контрольной шпонки, установленной в калибре-пробке и калибре-призме, составляет 13,985 мм. Наименьший предельный размер изношенной калибра-пробки – 49,982 мм. Установленные размеры должны контролироваться при поверке (калибровке) калибра-пробки и калибра-призмы, находящихся в эксплуатации, что позволит своевременно выявлять их износ.

Расположение поля допусков является важным для обеспечения точности изготовления шпоночных соединений, долговечности комплексных калибров, соответствия требованиям технической документации. Расположение полей допусков шпоночных калибров-пробок d_k , шпоночных калибров-пробок и калибров-призм b_k представлено на рисунке 1.

Таблица 3

Расчет предельных размеров изношенных калибра-пробки и калибра-призмы для контроля ширины паза под шпонку $\varnothing 14H9$ и внутреннего диаметра $\varnothing 50H8$

Table 3

Calculation of the limit dimensions of worn gauge plugs and gauge prisms for controlling the width of the $\varnothing 14H9$ keyway and the inner diameter of $\varnothing 50H8$

Определяемый размер	Предельный размер изношенного калибра	
	формула	расчет, мм
Толщина контрольной шпонки калибра-пробки и калибра-призмы, b_k	$b_k = b_{\min} - y_b$	$14,000 - 0,015 = 13,985$
Диаметр калибра-пробки, d_k	$d_k = d_{\min} - 2y - \frac{H}{2} - Z$	$50 - 2 \cdot 0,005 - \frac{0,004}{2} - 0,006 = 49,982$

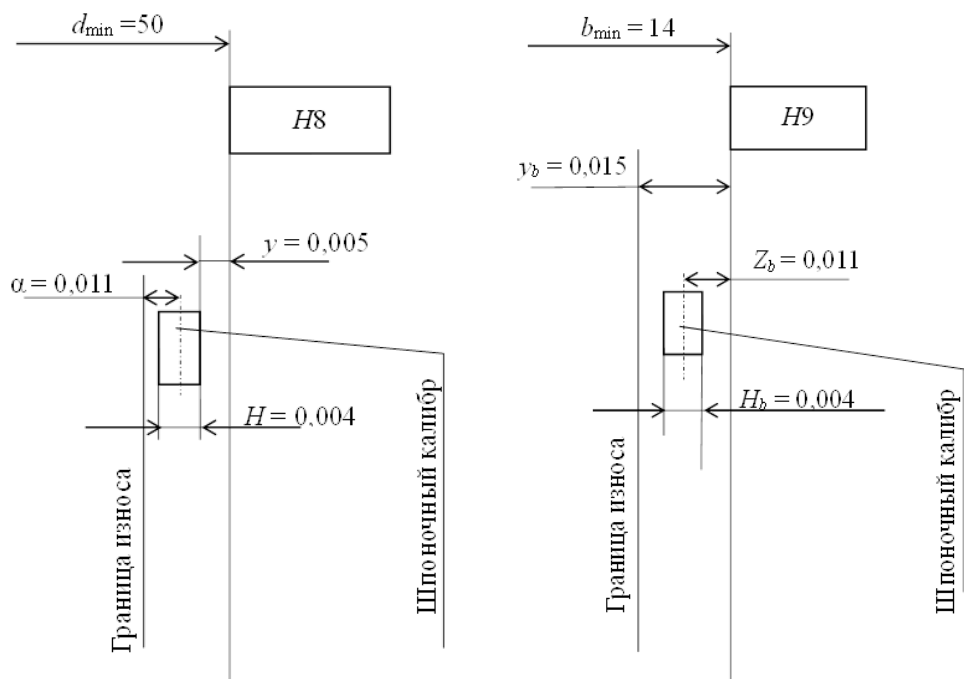


Рис. 1. Расположение полей допусков внутреннего диаметра вала $\varnothing 50H8$ и ширины паза под шпонку $14H9$

Fig. 1. Location of the tolerance fields for the inner diameter of the shaft $\varnothing 50H8$ and the keyway width $14H9$

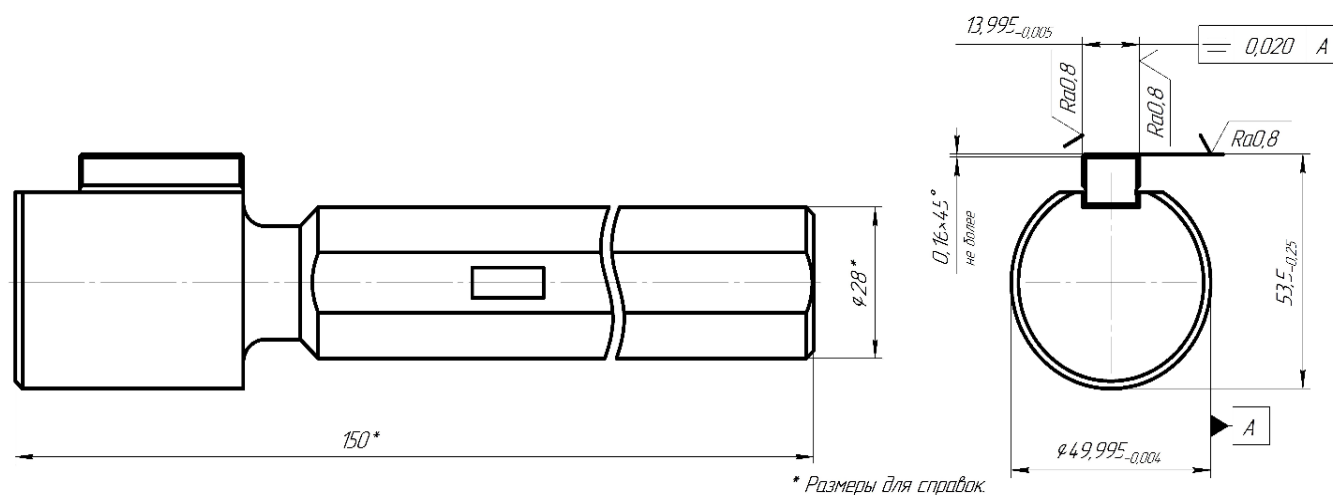


Рис. 2. Размеры шпоночной калибра-пробки

Fig. 2. Dimensions of a keyway plug gauge

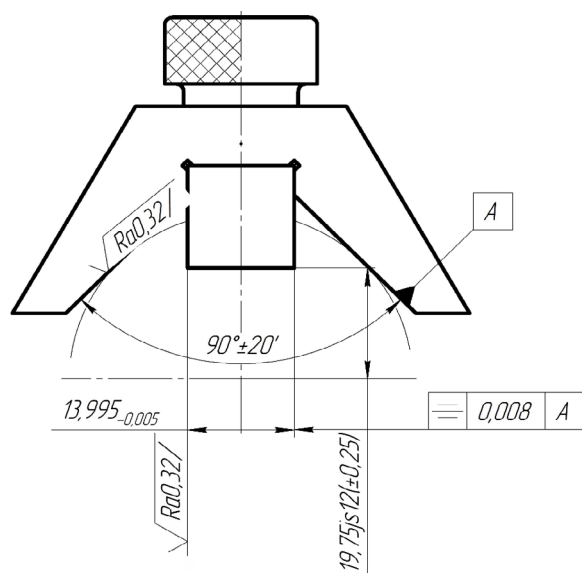


Рис. 3. Размеры шпоночной калибра-призмы

Fig. 3. Dimensions of a keyway prism gauge

Исполнительные размеры, указанные на эскизах с учетом верхних и нижних отклонений (рис. 2, 3), представляют собой основные параметры, по которым должны изготавливаться

комплексные калибры для контроля шпоночных соединений.

На эскизах комплексных калибров (рис. 2, 3) указаны не только предельные размер, но и требования к поверхностям, соблюдение которых является необходимым для обеспечения долговечности инструмента. Кроме того, следует отметить, что допуски на изготовление комплексных калибров значительно меньше, чем допуск на контролируемые параметры деталей, что обеспечивает точность и достоверность результатов контроля.

Выводы

1. Применение спроектированного набора комплексных калибров позволит достигнуть высокой точности измерений, повысить качество изготавливаемых деталей, сократить временные затраты на процесс технического контроля и оптимизировать его.

2. Предложенная методика проектирования комплексных калибров может применяться в машиностроении при разработке технических средств контроля геометрических параметров деталей.

Reference

Список источников

1. Дидманидзе О.Н., Парлюк Е.П., Пуляев Н.Н., Прокофьев М.М. Перспективы развития тракторостроения в России // Техника и оборудование для села. 2023. № 5 (311). С. 2-7. EDN: UKRERY
2. Дидманидзе О.Н., Девянин С.Н., Парлюк Е.П., Марков В.А. Энергообеспечение сельскохозяйственного тракторостроения России // Агроинженерия. 2021. № 2 (102). С. 4-8. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-2-4-8>
3. Кушнарев Л.И., Кушнарев С.Л. Качество продукции – основа конкурентоспособности российского машиностроения // Технический сервис машин. 2023. № 2 (151). С. 48-55. EDN: VOUCAT

1. Didmanidze O.N., Parlyuk E.P., Pulyaev N.N., Prokofiev M.M. Prospects for the development of tractor construction in Russia. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2023;5:2-7. (In Russ.)
2. Didmanidze O.N., Devyanin S.N., Parlyuk E.P., Markov V.A. Power supply of farm tractor industry in Russia. *Agricultural Engineering*. 2021;2:4-8. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-2-4-8>
3. Kushnarev L.I., Kushnarev S.L. Product quality as the basis of competitiveness of Russian engineering. *Machinery Technical Service*. 2023;2:48-55. (In Russ.)
4. Kushnarev L.I. Quality requirements of modern technology. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya*. 2019;2:18-21. (In Russ.)

4. Кушнарев Л.И. Требования к качеству современной техники // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2019. № 2. С. 18-21
5. Dudko V., Yuzbekova D., Gaidar S. et al. Tempering behavior of novel low-alloy high-strength steel. *Metals*. 2022;12(12):2177. <https://doi.org/10.3390/met12122177>
6. Gaidar S.M., Pavlov A.E., Pikina A.M. et al. Fractal characteristics of steel surface profilograms. *Steel in Translation*. 2024;54(11):1077-1081. <https://doi.org/10.3103/S0967091224701961>
7. Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Вергазова Ю.Г. и др. Расчет посадок соединений упругих втулочно-пальцевых муфт с валами // Вестник машиностроения. 2023. Т. 102, № 2. С. 96-101. EDN: ITNRLQ
8. Шкаруба Н.Ж. Современные организационные подходы к метрологическому обеспечению ремонтного производства // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». 2013. № 3 (59). С. 41-44. EDN: TEFXMV
9. Грановский В.А. Метрологическое обеспечение на промышленном предприятии: проблемы и решения // Датчики и системы. 2009. № 8. С. 94-108. EDN: KYOZMJ
10. Кривов А.С. Метрологическое обеспечение высокотехнологичного производства с учетом новых стандартов менеджмента качества // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2017. № 11. С. 24-28. EDN: ZVZVEN
11. Дорохов А.С., Краснящих К.А., Скороходов Д.М. Средства контроля качества сельскохозяйственной техники // Сельский механизатор. 2015. № 10. С. 34-35. EDN: UNUIAN
12. Глубокое А.В., Ястребова Т.С. Проблемы автоматизации выбора универсальных средств измерений линейных размеров // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2018. № 4 (26). С. 37-42. <https://doi.org/10.21685/2307-5538-2018-4-6>. EDN: VRZLBE
13. Силютин А.С., Филиппова Л.Б., Филиппов Р.А. и др. Автоматизация расчета калибра межосевого расстояния в условиях реального производства // Качество. Инновации. Образование. 2018. № 3 (154). С. 54-59. EDN: XWOZRI
14. Дубовик Е.А. Контроль полуоси заднего моста легкового автомобиля // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2022. № 2. С. 65-68. EDN: BRRRLP
15. Козлов В.Б., Истомин А.Б., Гемба И.Н. Ремонт и восстановление валов, муфт, шлицевых и шпоночных соединений // Главный механик. 2021. № 7. С. 32-43. EDN: SPEENH <https://doi.org/10.33920/pro-2-2107-03>
16. Шутиков М.А., Феофанов А.Н., Схиртладзе А.Г. Обеспечение эффективного контроля среднего диаметра резьбы калибров-пробок // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 3-4 (57). С. 110-114. EDN: YGTZPF
17. Дубовик Е.А. Сборка и разборка шатунно-поршневой группы машин // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2017. № 10. С. 449-454. EDN: ZQQUH
18. Мухиддинов К.С. Методы и средства контроля и качества сборки // Современные научные исследования и разработки. 2018. № 10 (27). С. 1084-1087. EDN: SLAHVR
5. Dudko V., Yuzbekova D., Gaidar S. et al. Tempering behavior of novel low-alloy high-strength steel. *Metals*. 2022;12(12):2177. <https://doi.org/10.3390/met12122177>
6. Gaidar S.M., Pavlov A.E., Pikina A.M. et al. Fractal characteristics of steel surface profilograms. *Steel in Translation*. 2024;54(11):1077-1081. <https://doi.org/10.3103/S0967091224701961>
7. Leonov O.A., Shkaruba N.J., Vergazova Yu.G. et al. Calculation of joint fits of elastic sleeve-pin couplings with shafts. *Vestnik Mashinostroyeniya*. 2023;102(2):96-101. (In Russ.)
8. Shkaruba N.J. Modern organizational approaches to measurement assurance repair production. *Vestnik of Federal State Educational Establishment of Higher Professional Education "Moscow State Agroengineering University named after V.P. Goryachkin"*. 2013;3:41-44. (In Russ.)
9. Granovskiy V.A. Measurement assurance at an industrial enterprise: problems and solutions. *Sensors & Systems*. 2009;8:94-108. (In Russ.)
10. Krivov A.S. Metrological assurance of high-tech production with the new quality management standards. *Pribory i sistemy. Upravleniye, kontrol, diagnostika*. 2017;11:24-28. (In Russ.)
11. Dorokhov A.S., Krasnyashchikh K.A., Skorokhodov D.M. Quality of agricultural machinery control tools. *Selskiy mekhanizator*. 2015;10:34-35. (In Russ.)
12. Glubokov A.V., Yastrebova T.S. Problems of automation of the selection of universal measuring instruments of linear dimensions. *Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2018;4:37-42. (In Russ.)
13. Silyutina A.S., Filippova L.B., Filippov R.A. et al. Automation of caliber calculation of the cross-section distance in conditions of real production. *Kachestvo. Innovatsii. Obrazovanie*. 2018;3:54-59. (In Russ.)
14. Dubovik E.A. Control of the semi-axle a rear axle of a passenger car. *Sborka v mashinostroyenii, priborostroyenii*. 2022;2:65-68. (In Russ.)
15. Kozlov V.B., Istomin A.B., Gemba I.N. Repair and restoration of shafts, couplings, splined and keyway joints. *Glavniy mekhanik*. 2021;7:32-43. (In Russ.)
16. Shutikov M.A., Feofanov A.N., Skhirtladze A.G. Providing effective monitoring of the middle thread diameter of internal gages. *International Research Journal*. 2017;3-4:110-114. (In Russ.)
17. Dubovik E.A. Assembling and disassembling the connecting rod and piston machines. *Sborka v mashinostroyenii, priborostroyenii*. 2017;10:449-454. (In Russ.)
18. Mukhiddinov K.S. Methods and means of the control and quality of assembling. *Sovremennye nauchnye issledovaniya i razrabotki*. 2018;10:1084-1087. (In Russ.)

Информация об авторах

- ¹ **Леонов Олег Альбертович**, д-р техн. наук, профессор;
oaleonov@rgau-msha.ru;
<https://orcid.org/0000-0001-8469-8052>;
SPIN-код: 9399-5650
- ² **Шкаруба Нина Жоровна**, д-р техн. наук, профессор;
shkaruba@rgau-msha.ru[✉];
<https://orcid.org/0000-0002-2770-8442>;
SPIN-код: 4773-0700
- ³ **Пупкова Дарья Александровна**, канд. техн. наук, доцент;
bogolyubova@rgau-msha.ru[✉];
<https://orcid.org/0000-0002-0273-2796>; SPIN-код: 4290-2003
- ⁴ **Гринченко Лаврентий Александрович**, канд. техн. наук,
старший преподаватель; grinchenko@rgau-msha.ru;
SPIN-код: 1654-9555
- ⁵ **Чепурин Александр Васильевич**, канд. техн. наук, доцент;
av.tchepurin@rgau-msha.ru;
<https://orcid.org/0000-0003-4699-4541>; SPIN-код: 9893-4966
- ⁶ **Леонов Василий Олегович**, студент; oaleonov@yandex.ru
- ^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Российский государственный аграрный университет –
МСХА имени К.А. Тимирязева; Россия; 127434, г. Москва,
Тимирязевская ул., 49

Вклад авторов

О.А. Леонов – методология, концептуализация;
Н.Ж. Шкаруба – формальный анализ, создание окончательной
версии (доработка) рукописи и ее редактирование;
Д.А. Пупкова – визуализация, ресурсы, создание черновика
рукописи;
Л.А. Гринченко – ресурсы;
А.В. Чепурин – визуализация, создание черновика рукописи;
В.О. Леонов – администрирование данных

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут
ответственность за плагиат

Статья поступила 17.02.2026, после рецензирования
и доработки 30.04.2026, принята к публикации 14.05.2026

Author Information

- Oleg A. Leonov**¹, DSc (Eng), Professor; oaleonov@rgau-msha.ru;
<https://orcid.org/0000-0001-8469-8052>;
Scopus Autor ID: 57209748174;
Researcher ID: ABC-5873-2020
- Nina Zh. Shkaruba**², DSc (Eng), Professor;
shkaruba@rgau-msha.ru;
<https://orcid.org/0000-0002-2770-8442>;
Scopus Autor ID: 57210255441;
Researcher ID: AAF-6340-2019
- Darya A. Pupkova**³[✉], CSc (Eng), Associate Professor,
<https://orcid.org/0000-0002-0273-2796>,
bogolyubova@rgau-msha.ru[✉]; Scopus ID: 57488490600;
Researcher ID AAD-6559-2022
- Lavrentiy A. Grinchenko**⁴, CSc (Eng), Senior Lecturer,
grinchenko@rgau-msha.ru; Scopus ID: 57224356749
- Aleksandr V. Chepurin**⁵, CSc (Eng), Associate Professor,
<https://orcid.org/0000-0003-4699-4541>,
av.tchepurin@rgau-msha.ru; Scopus ID: 57300359000
- Vasily O. Leonov**⁶, student, oaleonov@yandex.ru
- ^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev
Agricultural Academy; 127434, Russian Federation, Moscow,
Timiryazevskaya Str., 49

Author Contribution

O.A. Leonov – methodology, conceptualization;
N.Zh. Shkaruba – formal analysis, writing – review and editing
of the manuscript;
D.A. Pupkova – visualization, resources, writing – original draft;
L.A. Grinchenko – resources;
A.V. Chepurin – visualization, writing – original draft;
V.O. Leonov – data curation.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest and are responsible for pla-
giarism.

Received 17.02.2026; Revised 30.04.2026; Accepted 14.05.2026

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.3

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-3-111-119>



Причины и последствия аварийных отключений в сельских электрических сетях 0,4 кВ

А.В. Виноградова^{1,2}, А.В. Виноградов^{2,3}, Ю.Х. Шогенов⁴

¹ Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия

² Орловский государственный аграрный университет; г. Орёл, Россия

³ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия

⁴ Российская академия наук; г. Москва, Россия

^{1,2} alinawin@rambler.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8935-7086>

^{2,3} winaleksandr@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-8845-9718>

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

Аннотация. Причины аварийных отключений в сельских электрических сетях и их последствия учитываются при прогнозировании вероятных ущербов от отключений и подборе мероприятий по повышению надежности электроснабжения сельских потребителей. Исследования проведены с целью выявления численных показателей количества и последствий аварийных отключений в сельских электрических сетях 0,4 кВ. На основе анализа статистических данных о количестве аварийных отключений и причинах их возникновения в электрических сетях 0,4 кВ Орловской области рассчитали время восстановления и время восстановления электроснабжения, отключенную мощность и количество обесточенных точек подключения в электрических сетях 0,4 кВ. Наиболее частыми причинами отключений отмечены повреждения в сетях потребителей (53%), перегорание предохранителей, схлестывание проводов (6...7%). Невыявленные причины составляют 9...11%. Значимость причин по количеству отключений, времени перерывов в электроснабжении и восстановлению, отключенной мощности может отличаться. Отключенная мощность и количество обесточенных точек напрямую зависят от количества отключений. На основе рассчитанных количественных данных рекомендуем реализовать мероприятия по повышению надежности электроснабжения сельских электрических сетей 0,4 кВ: совершенствовать конфигурацию электрических сетей, провести секционирование линий электропередачи, оснастить сети средствами мониторинга параметров режимов работы, заменить голые провода изолированными. Проведенные исследования решают проблему выявления количества и последствий аварийных отключений в сельских электрических сетях 0,4 кВ при анализе эффективности функционирования систем электроснабжения сельских потребителей.

Ключевые слова: сельские электрические сети; электроснабжение; отключения; причины аварийных отключений; последствия аварийных отключений; отключенная мощность; количество обесточенных точек

Для цитирования: Виноградова А.В., Виноградов А.В., Шогенов Ю.Х. Причины и последствия аварийных отключений в сельских электрических сетях 0,4 кВ // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 3. С. 111-119. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-3-111-119>

ORIGINAL ARTICLE

Causes and consequences of emergency shutdowns in rural power grids of 0.4 kV

A.V. Vinogradova^{1,2✉}, A.V. Vinogradov^{2,3}, Yu.Kh. Shogenov⁴

¹ Federal Scientific Center for VIM; Moscow, Russia

² Orel State Agrarian University; Orel, Russia

³ Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia

⁴ Russian Academy of Sciences; Moscow, Russia

^{1,2} alinawin@rambler.ru✉; <https://orcid.org/0000-0002-8935-7086>

^{2,3} winaleksandr@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-8845-9718>

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

Abstract. The causes of emergency outages in rural power grids and their consequences must be considered when predicting probable damage from outages and selecting measures to improve the reliability of power supply to rural consumers. The study aimed to identify numerical indicators of both the frequency and the consequences of emergency outages in 0.4 kV rural power grids. Based on the analysis of statistical data on the number of emergency outages and their causes in 0.4 kV power grids of the Orel region, the authors calculated the following parameters: restoration time, power supply restoration time, interrupted power, and the number of de-energized connection points. The most frequent causes of outages were identified as damage in consumer networks (53%), blown fuses and unidentified causes (9-11% each), and wire clashing (6-7%). However, the significance of each cause varies depending on whether one considers the number of outages, the duration of power supply interruptions, restoration time, or interrupted power. Interrupted power and the number of de-energized points are directly related to the number of outages. Based on the calculated quantitative data, the following measures are recommended to improve the reliability of power supply to 0.4 kV rural power grids: improving the configuration of power grids; sectionalizing power lines; equipping power grids with means for monitoring operating mode parameters; replacing bare wires with insulated ones. This study addresses the problem of identifying the number and consequences of emergency outages in 0.4 kV rural power grids as part of analyzing the operational efficiency of power supply systems for rural consumers.

Keywords: rural power grids; power supply; outages; causes of emergency outages; consequences of emergency outages; interrupted power; number of de-energized points

For citation: Vinogradova A.V., Vinogradov A.V., Shogenov Yu.Kh. Causes and consequences of emergency shutdowns in rural power grids of 0.4 kV. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(3):111-119. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-3-111-119>

Введение

Системы электроснабжения должны быть устойчивыми, надежными и обеспечивать нормированное качество электроэнергии, поставляемой потребителям. Однако в сельских электрических сетях технологические нарушения (аварийные отключения) наблюдаются довольно часто. Данные обо всех аварийных отключениях заносятся в журналы отключений для дальнейшего анализа количества отказов и выявления их причин.

Анализ аварийности сельских электрических сетей 0,38 кВ, проведенный в Нижегородской области с 2016 по 2019 гг., показал, что удельная частота отказов составила 0,75, а среднее время ремонта – 2,2 ч [1]. Больше половины всех аварийных ситуаций возникает по неизвестным причинам.

Анализ причин отказов электрооборудования распределительных сетей 0,38 и 10 кВ в Рязани

и Рязанской области позволил авторам [2] продемонстрировать влияние природно-климатических факторов на отказы электрооборудования.

В Воронежской области частота отключений составляет 0,25, а среднее время восстановления – 4,5 ч. При этом в сельских сетях 90...95% отключений приходится на линии электропередачи (ЛЭП). Повышение надежности электроснабжения потребителя, резервируемого с помощью системы накопления энергии, позволяет сократить вероятное время отключений конкретного потребителя почти на 60% [3].

На основании комплексного анализа транспорта электрической энергии в распределительных сетях Саратовской и Оренбургской областей дана перспективная оценка надежности их функционирования [4, 5].

В качестве контрмеры по сокращению числа отключений в сельских электрических сетях 0,4 кВ

предложено устройство секционирования и разработан методика выбора мест установки соответствующих устройств [6].

Зависимость числа и продолжительности плановых и аварийных отключений для электрических сетей Орловской области проанализирована в работе [7]. На долю аварийных отключений приходится в среднем около 40% от общего количества отключений.

Анализ причин аварийных отключений и величин недоотпуска электроэнергии с учетом времени года выполняется также зарубежными исследователями. Нарушения в сетях потребителей, разрушение элементов конструкции ЛЭП и климатические условия являются основными причинами отключений [8]. Разрабатываются новые методы прогнозирования катастрофических отказов линий [9]. Интеллектуальная автоматизация и системы распределенной генерации способствуют сокращению времени восстановления электроснабжения и количества отключений за счет сегментирования сетей, обеспечения резервирования и изолированной работы участков сети [10].

Рассматривая причины аварийных отключений в сельских электрических сетях 0,4 кВ Нижегородской области, авторы [1] отмечают, что основными причинами отключений являются климатические воздействия (ветер, осадки) и посторонние воздействия: изменение стрелы провеса, обрывы проводов, недостатки эксплуатации в связи со сложностью контроля за состоянием сетей. Наибольшее количество отключений происходит по невыявленным причинам [1]. В работе¹ подтверждается, что в электрических сетях Нижегородской области частыми причинами отключений являются погодные условия (гроза, порывистый ветер и т.п.), обрывы проводов ввиду посторонних предметов и повреждения изоляторов. При этом около 58% отключений происходит по невыявленным причинам.

Аварийные отключения в Иркутской области связаны с нарушениями в сетях потребителей, повреждением изоляторов, проводов, разрядников, опор ВЛ, а также с климатическими воздействиями (ветер, снег, гололед, перекрытие изоляции и др.) [5]. Аналогичные причины аварийных отключений наблюдаются в Рязанской области [2].

Несмотря на наличие публикаций, освещающих причины аварийных отключений, в них отсутствуют

сведения о последствиях отключений в виде значений отключенной мощности, количества обесточенных точек подключений в привязке к их причинам. Нет таких данных и о причинах отключений, характерных для условий Орловской области.

Цель исследований: на основе анализа статистических данных выявить численные показатели количества и последствий аварийных отключений в сопоставлении с их причинами для сельских электрических сетей 0,4 кВ Орловской области.

Материалы и методы

Выполнен анализ журналов отключений в сельских электрических сетях 0,4 кВ Орловской области за период 2018-2023 гг. Анализируемые электрические сети содержат 12787 воздушных линий электропередачи 0,4 кВ суммарной протяженностью 10829 км. Основная часть сетей находится на балансе филиала ПАО «Россети Центр»-«Орёлэнерго», порядка 400 км электрических сетей находятся на балансе потребителя или бесхозные. Основными потребителями, питаемыми от рассмотренных электрических сетей, являются сельскохозяйственные предприятия и объекты коммунально-бытового сектора, жилые дома. Согласно предоставленным электросетевой организацией данным порядка 74% воздушных линий находятся в эксплуатации в течение более 35 лет, при этом неудовлетворительное состояние имеют только 2% из них. Большая часть сетей выработала свой нормативный срок службы, но за счет реализации программ технического ремонта и обслуживания они характеризуются высоким уровнем технического состояния.

Метод исследований включал в себя анализ журналов отключений по исследуемым сетям с целью сбора статистических данных, структурирование причин отключений с выявлением наиболее значимых причин. Исследовали количество отключений, время восстановления электроснабжения после отключений. Последствия отключений анализировали в сопоставлении с причинами по таким характеристикам, как количество обесточенных точек подключений и значение отключенной мощности.

Результаты и их обсуждение

На основании анализа журналов отключений в «Россети Центр»-«Орёлэнерго» все причины отключений сгруппировали в 19 категорий (табл. 1).

В таблице 2 приведены причины аварийных отключений, структурированные в порядке убывания значений показателей их количества,

¹ Коннов А.А. Анализ аварийности в электрических сетях 0,4 кВ Нижегородской области // Актуальные научные исследования в современном мире. 2020. № 5-1 (61). С. 127-130. EDN: VLTBDM.

**Распределение причин
аварийных отключений по категориям**

Таблица 1

Table 1

Distribution of emergency outage causes by category

Категория	Причина отключений
1	Атмосферные перенапряжения/гроза
2	Внутреннее повреждение автоматического выключателя
3	Гололедно-ветровые нагрузки, ветер, гололед
4	Деятельность сторонних лиц
5	Не выявлено
6	Обрыв провода
7	Падение деревьев, веток
8	Перегорание предохранителя
9	Перекрытие проводов по стороннему предмету
10	Пожар
11	Потребитель
12	Превышение габарита стрелы провеса
13	Пробой изолятора
14	Деятельность животных и птиц
15	Повреждение проводов и опор техникой
16	Схлестывание проводов
17	Падение опоры
18	Окисление контактных соединений
19	Ремонт трансформатора

суммарного времени восстановления и суммарного времени восстановления электроснабжения. Под суммарным временем восстановления, $T_{\text{в}}^{\text{об}}$ (ч), подразумевается сумма времени обнаружения и устранения отказов элементов электрической сети для рассматриваемого количества отказов за заданный период:

$$T_{\text{в}}^{\text{об}} = \sum_{i=1}^{n_{\text{ав}}} T_{\text{ви}}^{\text{об}},$$

где $T_{\text{ви}}^{\text{об}}$ – время обнаружения и устранения i -го отказа элемента электрической сети (соответствует длительности событий при аварийных отключениях в журнале отключений); $n_{\text{ав}}$ – количество аварийных отключений, ед. за заданный период.

Под суммарным временем восстановления электроснабжения, $T_{\text{в}}$ (ч), понимается сумма времени

обнаружения и устранения аварийного отключения в электрической сети с момента отключения до момента восстановления электроснабжения потребителей для рассматриваемого количества аварийных отключений за заданный период (определяется по сумме длительностей перерывов в электроснабжении при аварийных отключениях в журнале отключений):

$$T_{\text{в}} = \sum_{i=1}^{n_{\text{ав}}} T_{\text{ви}},$$

где $T_{\text{ви}}$ – время обнаружения и устранения i -го отказа в электрической сети с момента отключения до момента восстановления электроснабжения потребителей (соответствует длительности перерыва в электроснабжении при i -м аварийном отключении в журнале отключений).

В большинстве случаев аварийных отключений в сельских сетях 0,4 кВ значения указанных выше показателей совпадают, но при подаче резервного питания потребителям до устранения повреждения на основной питающей линии время восстановления электроснабжения меньше времени восстановления.

В таблице 2 приведены данные о девяти наиболее частых причинах аварийных отключений в филиале «Россети Центр»-«Орёлэнерго». Остальные причины, с суммарным вкладом в общее количество аварийных отключений менее 5%, объединены в строку «Прочее». Данные получены по результатам обработки журналов отключений за соответствующий период по филиалу «Россети Центр»-«Орёлэнерго».

Распределение причин аварийных отключений по количеству, времени восстановления и времени восстановления электроснабжения представлено на рисунке.

По причине «Потребитель» происходит 52% аварийных отключений. Время восстановления электроснабжения после отключений по данной причине составляет 42% от времени восстановления электроснабжения по всем причинам. Можно сделать вывод о том, что электрические сети, находящиеся на балансе потребителей, имеют низкий уровень технического состояния и обслуживания. Причина «Перегорание предохранителя» привела к 13% случаев аварийных отключений. Время восстановления и время восстановления электроснабжения по данной причине меньше, чем для причины «Обрыв провода», что связано с более продолжительным временем ремонта линии и восстановления электроснабжения при обрывах проводов, нежели при перегорании предохранителей.

Отметим, что невыявленные причины, занимающие третье место по количеству аварийных

Таблица 2

Распределение причин аварийных отключений в «Россети Центр»–«Орёлэнерго» по количеству, среднему времени восстановления и суммарному времени восстановления электроснабжения

Table 2

Distribution of emergency outage causes in Rosseti Center – Orelenergo by number, average restoration time, and total power supply restoration time

Причина отключений и номер ее категории	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.	2023 г.	Всего за 2018-2023 гг.
Количество отключений, год¹							
Потребитель (11)	412	392	446	488	1027	1748	4513
Перегорание предохранителя (8)	91	86	82	113	383	354	1109
Не выявлено (5)	0	0	0	72	363	361	796
Схлестывание проводов (16)	89	63	39	71	184	140	586
Обрыв провода (6)	108	77	39	63	76	115	478
Падение деревьев, веток (7)	137	92	52	13	20	34	348
Гололедно-ветровые нагрузки, ветер, гололед (3)	17	14	2	19	98	183	333
Атмосферные перенапряжения/гроза (1)	7	2	3	3	65	119	199
Перекрытие проводов по стороннему предмету (9)	3	0	4	29	62	54	152
Прочее	39	34	15	12	34	30	164
Всего	903	760	682	883	2312	3138	8678
Суммарное время восстановления, ч/год							
Потребитель (11)	706,3	433,8	564,7	796,8	1505,4	1833,1	5840,1
Обрыв провода (6)	383,1	241,3	130,2	213,4	280,4	387,5	1635,9
Перегорание предохранителя (8)	156,3	110,2	138,8	176,7	662,2	382	1626,2
Схлестывание проводов (16)	196,7	114,5	77,8	171,1	368,7	245,2	1174
Не выявлено (5)	0	0	0	96,1	517,4	427,8	1041,3
Падение деревьев, веток (7)	433,5	168,9	118,5	26,9	68,2	148,7	964,7
Гололедно-ветровые нагрузки, ветер, гололед (3)	27,1	35,2	2,4	13,8	227,6	194,8	500,9
Перекрытие проводов по стороннему предмету (9)	4,3	0	12,6	47	193,3	136,8	394
Атмосферные перенапряжения/гроза (1)	18,2	1,4	2,6	5,3	61,4	137,5	226,4
Прочее	175,7	61,4	42,9	43	91,4	141,4	555,8
Всего	2101,2	1166,7	1090,5	1590,1	3976	4034,8	13959,3
Суммарное время восстановления электроснабжения, ч/год							
Потребитель (11)	680,5	388,7	542,6	753,9	1366,9	1784,4	5517
Перегорание предохранителя (8)	156,07	110,2	138,8	176,7	661,4	380,9	1624,07
Обрыв провода (6)	381,9	205,7	106	213,4	278,6	382,9	1568,5
Схлестывание проводов (16)	196,2	99,6	77,8	171,1	368,5	245,2	1158,4
Не выявлено (5)	0	0	0	83,3	493,9	427,8	1005
Падение деревьев, веток (7)	433,25	168,9	118,5	26,9	68,2	148,7	964,45
Перекрытие проводов по стороннему предмету (9)	4,3	0	8,5	47	193	136,8	389,6
Гололедно-ветровые нагрузки, ветер, гололед (3)	27,1	35,2	2,4	13,3	59,3	194,7	332
Атмосферные перенапряжения/гроза (1)	18,2	1,4	2,6	5,3	61,3	137,5	226,3
Прочее	175,59	61,31	42,9	43	91,4	121,9	536,21
Всего	2073,11	1071,01	1040,1	1533,9	3642,5	3960,8	13321,53

отключений, по временным показателям находятся на пятом месте. Интересным является тот факт, что до 2020 г. причина «Не выявлено» отсутствовала в журналах отключений, но начиная с 2021 г. стала отмечаться примерно в 10% случаев аварийных отключений. Порядка 3% от общего времени восстановления приходится на данный показатель.

Причины «Атмосферные перенапряжения», «Гололедно-ветровые нагрузки», «Схлестывание

проводов», «Падение деревьев» можно было бы объединить в одну причину – «Влияние природно-климатических факторов». Однако это не сделано в связи с различием мер по предотвращению данных причин и действий по восстановлению электроснабжения.

Помимо временных показателей, в энергосистеме рассмотрены отключенная мощность и количество обесточенных точек в зависимости от причин отключений (табл. 3).

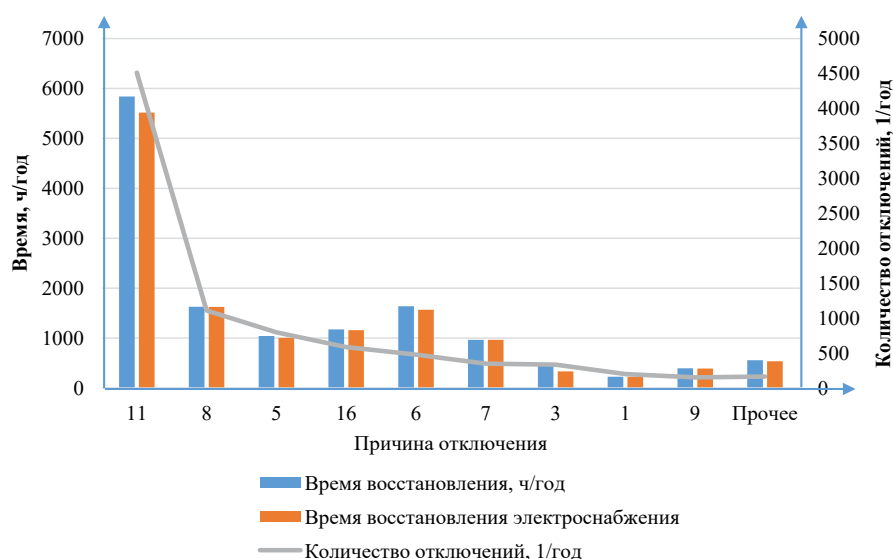


Рис. Распределение причин аварийных отключений по количеству, времени восстановления и времени восстановления электроснабжения

Fig. Distribution of emergency outage causes by number, restoration time, and power supply restoration time

Распределение отключенной мощности и обесточенных точек подключения по причинам отключений

Таблица 3

Distribution of interrupted power and de-energized connection points by outage cause

Table 3

Причина отключений и номер ее категории	Количество отключений, ед.	Отключенная мощность, МВт	Количество обесточенных точек подключения, ед.
Потребитель (11)	4513	81,284	68300
Перегорание предохранителя (8)	1109	13,447	14123
Не выявлено (5)	796	7,819	11402
Схлестывание проводов (16)	586	8,371	8666
Обрыв провода (6)	478	10,368	7749
Падение деревьев, веток (7)	348	5,352	5251
Гололедно-ветровые нагрузки, ветер, гололед (3)	333	2,975	4607
Атмосферные перенапряжения/гроза (1)	199	1,67	3175
Перекрытие проводов по стороннему предмету (9)	152	2,064	2058
Прочее	164	4,3024	3017
Всего	8678	137,6524	128348

Согласно данным таблицы 3 отключенная мощность и количество обесточенных точек подключения напрямую зависят от количества отключений. Потребитель является наиболее значимой причиной аварийных отключений как по отключенной мощности (59%), так и по количеству обесточенных точек подключения (53%).

По показателю отключенной мощности причины «Перегорание предохранителя», «Обрыв провода» составляют примерно по 10%. На причины «Схлестывание проводов» и «Не выявлено» приходится по 5,5...6,0%. Остальные показатели составляют менее 4%.

По показателю количества обесточенных точек подключения причины «Перегорание предохранителя» и «Не выявлено» составляют по 9...11%; «Схлестывание проводов» и «Обрыв провода» – по 6...7%, остальные показатели – менее 4%.

Основными при отключениях в Нижегородской, Иркутской и других областях [1, 2, 5] считаются причины «Невыявленные», «Климатические воздействия», «Обрывы проводов» и т.д. При этом долевое распределение количества отключений по причинам несколько отличается, что связано как с климатическими и географическими, хозяйственно-экономическими особенностями регионов, так и с особенностями классификации причин отключений разных авторов. К сожалению, в источниках [1, 2, 5] не приводятся численные характеристики последствий отключений, что затрудняет их сравнение с последствиями в Орловской области. Это подтверждает актуальность подобных исследований для регионов страны. Такие исследования позволят выявить особенности последствий отключений и выработать наиболее эффективные меры по их снижению.

На показатели последствий аварийных отключений влияют и особенности конфигурации электрических сетей. В частности, отсутствие средств секционирования в электрических сетях 0,4 кВ приводит к тому, что любая причина влечет за собой отключение всех потребителей, подключенных к одной ЛЭП. Отсутствие решений по резервированию электроснабжения приводит к увеличению времени восстановления электроснабжения до значений времени восстановления. Следовательно, внедрение средств мониторинга в электрических сетях позволит быстрее выявлять отключения, места повреждения, причину, а также сокращать время

восстановления электроснабжения. Применение средств управления конфигурацией, в частности, средств секционирования электрических сетей, позволит снизить число отключенных точек подключения и отключенную мощность за счет локализации мест повреждения ЛЭП по причине обрыва провода, схлестывания проводов и др. Применение средств сетевого резервирования позволиткратно снизить время восстановления электроснабжения, поскольку по резервным линиям будет подано напряжение потребителям независимо от времени восстановления основных питающих линий. Замена голых проводов изолированными самонесущими позволит снизить число и последствия отключений, связанных с схлестыванием проводов, перекрытием по ветвям деревьев и по ряду других причин. Следует анализировать все меры по предотвращению аварийных отключений, вызванных разными причинами.

Выводы

1. Аварийные отключения в сельских электрических сетях 0,4 кВ Орловской области чаще всего (52% случаев) вызваны повреждениями в потребительских сетях. Около 5...13% отключений связано с такими причинами, как «Перегорание предохранителя», «Не выявлено», «Схлестывание проводов» и «Обрыв провода». По остальным причинам: «Падение деревьев, веток», «Гололедно-ветровые нагрузки», «Атмосферные перенапряжения», «Перекрытие проводов по стороннему предмету» – это происходит в 2...4% случаев.

2. Аварийные отключения характеризуются количеством, временем восстановления электроснабжения и временем восстановления. Последствия отключений можно оценить количественно через отключенную мощность и количество обесточенных точек подключения. Причиной аварийных отключений в 59% случаев по отключенной мощности и 53% по количеству обесточенных точек подключения является потребитель. Значимость причин по количеству отключений, времени восстановления электроснабжения и восстановления, отключенной мощности может различаться.

3. Внедрение средств мониторинга в электрических сетях и применение средств секционирования и резервирования позволят сократить количество и последствия аварийных отключений, вызванных разными причинами.

Список источников

1. Сбитнев Е.А., Жужин М.С. Анализ аварийности сельских электрических сетей 0,38 кВ нижегородской энергосистемы // Вестник НГИЭИ. 2020. № 11 (114). С. 36-47. EDN: KEJHDX
2. Васильева Т.Н., Лопатин Е.И. Анализ причин отказов электрического оборудования распределительных сетей 0,38...10 кВ // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. 2011. № 3 (11). С. 64-66. EDN: OFSKQV
3. Извеков Е.А., Картавец В.В. Оценка повышения надежности электроснабжения потребителя, резервируемого с помощью системы накопления энергии // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2022. Т. 15, № 2 (73). С. 53-63. EDN: EUOHQX
4. Наумов И.В. Перспективная оценка надежности функционирования электрических сетей (на примере филиала ПАО «Россети Волги»-«Саратовские распределительные сети») // Журнал Сибирского федерального университета. Серия «Техника и технологии». 2024. Т. 17, № 3. С. 360-377. EDN: MOAVXR
5. Наумов И.В., Полковская М.Н. Аналитическая оценка функционирования распределительных электрических сетей ПАО «Россети Волга»-«Оренбургэнерго» // Журнал Сибирского федерального университета. Серия «Техника и технологии». 2024. Т. 17, № 8. С. 988-1006. EDN: XTMYNH
6. Виноградов А.В., Сейфуллин А.Ю., Букреев А.В. Определение рациональных мест размещения мультиточечных коммутационных систем // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2024. Т. 18, № 3. С. 82-90. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2024-18-3-82-90>
7. Виноградова А.В., Виноградов А.В., Букреев А.В. Удельные показатели надежности электрических сетей 0,4 кВ // Агроинженерия. 2024. Т. 26, № 6. С. 77-85. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-6-77-85>
8. Breido I., Kaverin V., Ivanov V. Telemetric Monitoring Insulation Condition of High Voltage Overhead Power Lines. *Proceedings of the 29th DAAAM International Symposium*, 2018. Pp. 0319-0328. <https://doi.org/10.2507/29th.daaam.proceedings.046>
9. Chatterjee S., Roy B. Prediction of line contingency catastrophic failures using synchrophasor measurements. *Journal of Control Automation and Electrical Systems*. 2019;30(6):1107-1115. <https://doi.org/10.1007/s40313-019-00501-x>
10. Böhm R., Rehtanz Ch., Franke J. Strategy for implementing black start and islanded operation capabilities on distribution system level. *Energy Systems Research*. 2018;1(1):9-20. <https://doi.org/10.25729/esr.2018.01.0001>

Информация об авторах

Виноградова Алина Васильевна, канд. техн. наук, доцент; Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5; Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина; 302019, Российская Федерация, Орловская обл., г. Орёл, ул. Генерала Родина, 69; alinawin@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-8935-7086>; SPIN-код: 8836-8684, AuthorID: 717846

Виноградов Александр Владимирович, д-р техн. наук, доцент, профессор; Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина; 302019, Российская Федерация, Орловская обл., г. Орёл,

References

1. Sbitnev E.A., Zhuzhin M.S. Accident rate analysis of rural electric networks 0.38 kV of the Nizhny Novgorod power system. *Vestnik NGIEI*. 2020;11:36-47. (In Russ.)
2. Vasilyeva T.N., Lopatin E.I. The analysis of causes of failures of the electric equipment of distributive networks 0,38 ... 10 kV. *Bulletin of the Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev*. 2011;3:64-66. (In Russ.)
3. Izvekov E.A., Kartavtsev V.V. Evaluation of reliability improvement of electric power supply to a consumer reserved with the help of an energy storage system. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2022;15(2):53-63. (In Russ.)
4. Naumov I.V. A prospective assessment of the functioning electric networks reliability using the example of the PJSC Rosseti Volga – Saratov distribution networks branch. *Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies*. 2024;17(3):360-377. (In Russ.)
5. Naumov I.V., Polkovskaya M.N. Analytical assessment of the functioning of distribution electric networks of PJSC Rosseti Volga – Orenburgenergo. *Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies*. 2024;17(8):988-1006. (In Russ.)
6. Vinogradov A.V., Seyfullin A.Yu., Bukreev A.V. Determining the optimal location for multi-contact switching systems. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024;18(3):82-90. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2024-18-3-82-90>
7. Vinogradova A.V., Vinogradov A.V., Bukreev A.V. Study of specific reliability indicators of 0.4 kV power networks. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2024;26(6):77-85. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-6-77-85>
8. Breido I., Kaverin V., Ivanov V. Telemetric Monitoring Insulation Condition of High Voltage Overhead Power Lines. *Proceedings of the 29th DAAAM International Symposium*, 2018. Pp. 0319-0328. <https://doi.org/10.2507/29th.daaam.proceedings.046>
9. Chatterjee S., Roy B. Prediction of line contingency catastrophic failures using synchrophasor measurements. *Journal of Control Automation and Electrical Systems*. 2019;30(6):1107-1115. <https://doi.org/10.1007/s40313-019-00501-x>
10. Böhm R., Rehtanz Ch., Franke J. Strategy for implementing black start and islanded operation capabilities on distribution system level. *Energy Systems Research*. 2018;1(1):9-20. <https://doi.org/10.25729/esr.2018.01.0001>

Author Information

Alina V. Vinogradova, CSc (Eng), Associate Professor; Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 109428, Russia, Moscow, 1st Institutskiy Proezd Str., 5; Orel State Agrarian University; 302019, Russian Federation, Orel, Generala Rodina Str., 69; alinawin@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-8935-7086>; Scopus ID: 5720415240; Researcher ID AAM-9111-2021

Aleksandr V. Vinogradov, DSc (Eng), Associate Professor; Orel State Agrarian University; 302019, Russian Federation, Orel, Generala Rodina Str., 69; Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 127434, Russian Federation, Moscow, Timiryazevskaya Str., 49; winalleksandr@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-8845-9718>;

ул. Генерала Родина, 69; Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; winaleksandr@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-8845-9718>; SPIN-код: 6652-9426, AuthorID: 690615

Шогенов Юрий Хасанович, академик РАН, д-р техн. наук, начальник сектора механизации, электрификации и автоматизации отдела сельскохозяйственных наук; Российская академия наук; 119991, Российская Федерация, г. Москва, Ленинский пр-т, 14; yh1961s@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7588-0458>; SPIN-код: 7335-0970; Researcher ID AAR-1140-2020

Вклад авторов

Виноградова А.В. – концептуализация, формальный анализ, создание черновика рукописи, визуализация;
Виноградов А.В. – концептуализация, методология, проведение исследований, ресурсы, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;
Шогенов Ю.Х. – методология, верификация данных, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 21.10.2025, после рецензирования и доработки 18.05.2026, принята к публикации 20.05.2026

Scopus Author ID: 57201923234; Researcher ID AAW-4375-2021

Yuriy Kh. Shogenov, Full Member of the Russian Academy of Sciences, DSc (Eng), Head of the Mechanization, Electrification, and Automation Sector of the Agricultural Science Department; Russian Academy of Sciences, 119991, Russian Federation, Moscow, Leninskiy Ave., 14; yh1961s@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7588-0458>; Researcher ID AAR-1140-2020

Author Contribution

A.V. Vinogradova – conceptualization, formal analysis, writing – original draft, visualization
A.V. Vinogradov – conceptualization, methodology, investigation, resources, writing – review and editing of the manuscript
Yu.Kh. Shogenov – methodology, data curation, validation, writing – review and editing of the manuscript

Conflict of interests

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

Received 21.10.2025; Revised 18.05.2026; Accepted 20.05.2026

ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 378.4:378.147.88

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-3-120-128>



Формирование образовательных консорциумов «Аграрный вуз – НИИ – машиностроительное предприятие – агрохолдинг»: модели и практики

М.С. Бережная^{1,2}

¹ Финансовый университет при Правительстве РФ; г. Москва, Россия

² Институт содержания и методов обучения имени В.С. Леднева; г. Москва, Россия

bpsiconsult@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5325-8302>

Аннотация. Вызовы для российского агропромышленного комплекса обуславливают необходимость внедрения новых организационно-управленческих моделей и модернизации аграрного университета для синхронизации с трендами отрасли и повышения результативности подготовки научно-педагогических кадров. С целью систематизации эффективных моделей интеграции и обоснования условий результативности аграрных консорциумов проведен анализ действующих моделей, договорных механизмов и распределения ролей в образовательных консорциумах формата «Аграрный вуз – НИИ – машиностроительное предприятие – агрохолдинг». Методология исследований, построенная на сравнительном исследовании конкретных кейсов и контент-анализе открытых данных, позволила проанализировать опыт девяти ведущих аграрных университетов страны включая РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, Кубанский ГАУ и Уральский ГАУ, систематизировать более 40 конкретных партнерств с предприятиями и 15 профильными НИИ. В результате выявлена и детально описана типология ключевых моделей интеграции – таких, как «Системное кадровое партнерство», «Экспортно-инновационная» и «Технократическая модель глубокой материально-технической интеграции». Каждая из них иллюстрируется конкретными кейсами: от создания агроклассов в Эфиопии (Кубанский ГАУ) и пятилетней программы селекционных исследований (Уральский ГАУ) до промышленных испытаний университетского биофунгицида на полях холдинга «Прогресс Агро». В работе рассматриваются договорные механизмы и распределение ролей в консорциумах, показывается катализирующая роль государственных программ (например, «Приоритет-2030») и доказывается, что подобные альянсы трансформируются из локальных инициатив в устойчивые экосистемы, непосредственно влияющие на прогнозируемое социально-экономическое развитие сельских территорий.

Ключевые слова: образовательный консорциум; аграрный вуз; университет; НИИ; машиностроительное предприятие; агрохолдинг; АПК; подготовка кадров

Для цитирования: Бережная М.С. Формирование образовательных консорциумов «Аграрный вуз – НИИ – машиностроительное предприятие – агрохолдинг»: модели и практики // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 3. С. 120-128. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-3-120-128>

ORIGINAL ARTICLE

Estalishing of educational consortia “University – Research Institute – Engineering Enterprise – Large Agro-Holding”: models and practices

M.S. Berezhaia^{1,2}

¹ Financial University under the Government of the Russian Federation; Moscow, Russia

² Institute for Content and Methods of Education named after V.S. Lednev; Moscow, Russia

beipsiconsult@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5325-8302>

Abstract. Challenges facing the Russian agro-industrial sector call for new organizational and managerial models and the modernization of agricultural universities to synchronize with industry trends and improve the effectiveness of training scientific and pedagogical personnel. To systematize effective models of integration and determine the conditions for the effectiveness of agricultural consortia, the author conducted the existing models, contractual mechanisms, and role distribution in educational consortia of the “Agricultural University – Research Institute – Engineering Company – Agricultural Holding” format. The research methodology was based on a comparative study of specific cases and content analysis of open data. This approach made it possible to analyze the experience of nine leading agricultural universities in the Russian Federation. These included the Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Kuban State Agrarian University, and Ural State Agrarian University. As a result, the study systematized more than 40 specific partnerships with enterprises and 15 specialized research institutes. As a result, a typology of key integration models was identified and described in detail, such as “systemic human resource partnership,” “export-innovation,” and “technocratic model of deep material and technical integration.” Each of these models is illustrated with specific case studies – from agricultural classes in Ethiopia (Kuban State Agrarian University) and a five-year breeding research program (Ural State Agrarian University) to industrial trials of a university-developed biofungicide in the fields of the Progress agroholding company. The paper examines contractual mechanisms and role distribution within consortia, demonstrates the catalyzing role of government programs (e.g., Priority 2030), and proves that such alliances are transformed from local initiatives into sustainable ecosystems that directly influence the predictable socio-economic development of rural areas.

Keywords: educational consortium; agricultural university; university; research institute; engineering company; agroholding; agro-industrial sector; workforce development

For citation: Berezhaia M.S. Estalishing of educational consortia “University – Research Institute – Engineering Enterprise – Large Agro-Holding”: models and practices. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(3):120-128. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-3-120-128>

Введение

Формирование образовательных консорциумов формата «Аграрный вуз – НИИ – машиностроительное предприятие – агрохолдинг» является стратегическим ответом на вызовы технологического развития и импортозамещения в российском агропромышленном комплексе (АПК). Теоретической основой служат принципы сетевого взаимодействия, направленные на создание бесшовной системы генерации, трансфера и внедрения знаний [1]. Исторические предпосылки глубокой интеграции образования и производства заложены в практике ведущих аграрных школ – например, в деятельности профессора В.П. Горячкина в РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева [2]. В современных условиях такая интеграция становится методологической основой подготовки

кадров в системе непрерывного профессионального образования [3].

Современные исследования актуализируют понимание государственных приоритетов и технологических вызовов. В рамках Программы фундаментальных научных исследований (2021-2030 гг.) осуществляется переход к применению цифровых технологий, генетики и роботизации при формировании запроса на кадры нового профиля [4]. Научное обеспечение АПК требует решения комплексных задач и междисциплинарных компетенций [5]. Ответом становится поиск новых организационно-управленческих моделей. Необходимы глубокая модернизация аграрного университета для синхронизации с трендами отрасли [6], развитие сетевого взаимодействия, в том числе в СПО [7], и повышение результативности

подготовки научно-педагогических кадров через аспирантуру [8].

Экономический контекст определяется необходимостью импортозамещения и повышения конкурентоспособности и делает партнерство с реальным сектором условием развития [9]. Миссия-ориентированный подход в стратегии инновационного развития сельского хозяйства отводит государству роль инвестора и создателя рынков, влияя на логику формирования ГЧП в образовании [10]. Таким образом, консорциум «Аграрный вуз – НИИ – машиностроительное предприятие – агрохолдинг» представляет собой не локальную инициативу, а системный ответ, интегрированный в национальную политику.

В консорциуме каждый партнер играет четкую роль: университет – интегратор и образовательное ядро; НИИ – генератор знаний; машиностроительное предприятие (например, «Ростсельмаш») – индустриальный исполнитель; агрохолдинг («Мираторг», «ЭкоНива») – стратегический заказчик и потребитель кадров. Успех альянса зависит от проработанных договорных механизмов (рамочные соглашения, «дорожные карты», контракты на НИОКР), активного участия индустриальных партнеров в создании образовательных программ, базовых кафедр и лабораторий. Государственные программы («Приоритет-2030») выступают катализатором, хотя реализация нацпроектов порождает управленческие сложности [11]. Качество «модели специалиста» определяется не только знаниями, но и системой ценностей [12], а мотивация молодежи – качеством жизни и возможностями самореализации [13]. Образование приобретает предпринимательский вектор [14], формируя человеческий капитал как основной ресурс [15]. Модель консорциума преодолевает разрыв между теорией и практикой, создавая систему для технологического суверенитета АПК, и вносит вклад в развитие сельских территорий [16].

Цель исследований: анализ действующих моделей, договорных механизмов и распределения ролей в образовательных консорциумах формата «Аграрный вуз – НИИ – машиностроительное предприятие – агрохолдинг» для выявления наиболее результативных практик сетевого взаимодействия, систематизации организационно-договорных механизмов и теоретического обоснования влияния отраслевой специфики и государственных программ на эффективность консорциумов.

В соответствии с целью были поставлены следующие задачи:

- теоретически обосновать формирование консорциумов на основе принципов сетевого

взаимодействия и концепции непрерывного образования;

- выявить и типизировать практические модели интеграции на основе сравнительного анализа партнерств ведущих аграрных вузов;

- выявить организационно-договорные механизмы и распределение функций между участниками консорциумов;

- оценить влияние аграрной специфики и государственных программ на построение и эффективность данных альянсов.

Материалы и методы

Методологическую основу исследований составил комбинированный подход, включающий в себя теоретический анализ, сравнительный анализ кейсов вузов и систематизацию эмпирических данных. Целью было не только выявление моделей консорциумов, но и реконструкция их внутренних механизмов и практик взаимодействия.

Теоретико-методологический анализ научной литературы [1, 2, 15] позволил сформировать концептуальный каркас и определить ключевые категории: «Модель консорциума», «Формат интеграции», «Распределение ролей», «Договорной механизм». Особое внимание уделено выполнению анализа государственной политики (Программа фундаментальных научных исследований на 2021-2030 гг.) и ее связи с практикой вузов [4, 10].

Эмпирическая часть основана на сравнительном анализе кейсов и контент-анализе документов по девяти ведущим аграрным университетам России (2022-2025 гг.). Источниками исследований являются официальные сайты, тексты соглашений и «дорожных карт», научные публикации по совместным проектам (например, испытания биофунгицида Кубанского ГАУ с «Прогресс Агро»). Систематизировано описание более 40 партнерств, 15 отраслевых НИИ и свыше 100 компаний-партнеров. Методом качественной классификации выявлены и типологизированы ключевые модели взаимодействия («Системное кадровое партнерство», «Экспортно-инновационная модель», «Технократическая модель глубокой интеграции» и др.).

Для анализа договорных механизмов и распределения ролей использовался метод логической реконструкции на основе описания форматов сотрудничества (базовые кафедры, совместные лаборатории, целевая аспирантура, «дорожные карты»). Реконструкция верифицирована через кросс-анализ кейсов и сопоставление с теоретическими моделями.

Примененный комплекс методов позволил перейти от описания отдельных примеров к системному

анализу формирующейся экосистемы образовательных консорциумов в российском АПК, выявив общие закономерности и региональную специфику.

Результаты и их обсуждение

В соответствии с поставленной целью и задачами исследований систематизированы действующие модели, механизмы и распределение ролей в образовательных консорциумах формата «Аграрный вуз – НИИ – машиностроительное предприятие – агрохолдинг». Результаты анализа кейсов

9 аграрных университетов РФ подтверждают, что подобные альянсы являются системным ответом на технологические и кадровые вызовы российского АПК (табл. 1).

В таблице 1 представлены ключевые, но не исчерпывающие списки партнеров. Активное включение в экосистему ведущих предприятий сельхозмашиностроения – таких, как «Ростсельмаш», «Петербургский тракторный завод», и отраслевых институтов развития, а также проведение масштабных мероприятий («Золотая осень», конкурс им. А.А. Ежевского) демонстрируют трансформацию разрозненных

Таблица 1

Партнерская экосистема ведущих аграрных университетов РФ (структура консорциума «Аграрный вуз – НИИ – машиностроительное предприятие – агрохолдинг»)

Table 1

Partner ecosystem of leading agrarian universities of the Russian Federation (Structure of the “University – Research Institute – Engineering Company – Large Agroholding” Consortium)

Университет	Научно-исследовательский институт (НИИ) – партнер	Машиностроительное предприятие – партнер	Агрохолдинг / агропредприятие – партнер	Формы и направления сотрудничества
РГАУМСХА им. К.А. Тимирязева (Москва)	Всероссийский НИИ сельскохозяйственной биотехнологии (ВНИИСБ), Всероссийский НИИ фитопатологии, ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, другие институты Отделения сельскохозяйственных наук РАН	РОССПЕЦМАШ (концерн включая «Ростсельмаш»), Петербургский тракторный завод	Агрофирма «Партнер» (Коломна). Благотворительный фонд «Система» (с доступом к компаниям: агрохолдинг «СТЕПЬ», Natura Siberica, Segezha Group и др.)	Создание совместных лабораторий и научных центров (например, по геномному редактированию растений). Выполнение НИР в рамках госпрограмм. Организация специализированной выставки «Золотая осень». Участие и победы в конкурсе для вузов им. А.А. Ежевского (РОССПЕЦМАШ). Открытие новых учебных классов, оснащенных техникой «Ростсельмаш». Разработка образовательных модулей. Масштабные профориентационные проекты («Университетские смены»)
Кубанский ГАУ (Краснодар)	ВНИИМК, КубНИИТИМ, Национальный научный центр «ВНИИ виноградарства и виноделия им. Я.И. Потапенко»	«Ростсельмаш» (демонстрационно-учебный полигон, поставка техники)	ООО НПП «ГЕНЕЗИС» (инвестор). ГК «Прогресс Агро» (агрохолдинг). Агрофирма «Южная» (виноградарство)	Совместная селекционная работа. Проведение полевых и промышленных испытаний техники и препаратов (испытания биофунгицида). Создание базовых кафедр. Реализация программ целевой аспирантуры. Работа на демонстрационно-учебном полигоне с техникой «Ростсельмаш». Экспорт образовательных технологий (агроклассы в Эфиопии)
Уральский ГАУ (Екатеринбург)	Уральский НИИ сельского хозяйства (УралНИИСХ) – филиал УрФАНИЦ УрО РАН, Российский НИИ сорго и кукурузы (РосНИИСХ)	«КРОНЕ Русь», «Гомсельмаш», «Ростсельмаш» (партнерство в рамках консорциума)	ГК «Гавриш» (селекция и семеноводство)	Долгосрочные программы совместных исследований в области селекции и семеноводства (5-летняя программа). Адаптация сельхозтехники к местным условиям. Создание опытных полигонов. Инфраструктурная интеграция (брендируемые учебные лаборатории от «КРОНЕ Русь»)
Алтайский ГАУ (Барнаул)	Сибирский НИИ механизации и электрификации сельского хозяйства (СибИМЭ), АлтНИИСХ	«Ростсельмаш» (партнер по оснащению техникой), Петербургский тракторный завод	ООО «Хизара» (сервис агродронов)	Научно-исследовательское сотрудничество в области цифровизации АПК и роботизации. Разработка совместных методик применения БПЛА. Участие в создании инженерного класса. Оснащение учебных классов современной сельхозтехникой

Окончание табл. 1

Университет	Научно-исследовательский институт (НИИ) – партнер	Машиностроительное предприятие – партнер	Агрохолдинг / агропредприятие – партнер	Формы и направления сотрудничества
Дагестанский ГАУ (Махачкала)	Дагестанский НИИ сельского хозяйства им. Ф.Г. Кисриева, Прикаспийский НИИ аридного земледелия	«Ростсельмаш» (региональный дилер, поставки техники для учебных целей)	Агрокомпания «Согратл», СПОК «Сари Хум», Союз садоводов Дагестана	Совместные прикладные исследования в области горного и предгорного земледелия, садоводства. Участие специалистов НИИ в качестве экспертов в учебном процессе. Практические занятия на технике «Ростсельмаш». Развитие института именных стипендий
Ставропольский ГАУ (Ставрополь)	Ставропольский НИИ сельского хозяйства, Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр (СКФ НАЦ)	«Ростсельмаш», Петербургский тракторный завод (партнеры по модернизации МТП)	Группа агропредприятий «Ресурс» (ГАП «Ресурс»)	Выполнение комплексных НИР по повышению продуктивности и устойчивости агроэкосистем Ставрополья. Создание целевых программ подготовки кадров для научных учреждений. Совместные проекты по адаптации техники для региона. Системная профориентационная работа со школьниками
Вавилонский университет (Саратовский ГАУ)	Поволжский НИИ производства и переработки мясо-молочной продукции, НИИ сельского хозяйства Юго-Востока	«Ростсельмаш» (долгосрочный партнер, участие в ярмарках вакансий)	ГК «Доминант» (агрохолдинг)	Кадровое и научное обеспечение производства. Совместные исследования в области животноводства и кормопроизводства. Базы для практик на опытных полях НИИ. Организация практик и стажировок на предприятиях «Ростсельмаш». Проведение ярмарок вакансий
Воронежский ГАУ (Воронеж)	Воронежский федеральный аграрный научный центр им. В.В. Докучаева (ВФ АНЦ), Всероссийский НИИ зернобобовых и крупяных культур (ВНИИЗБК)	«Ростсельмаш» (ключевой индустриальный партнер, оснащение лабораторий)	ГК «ЭкоНива» (молочный холдинг)	Создание агроклассов с научно-популярной компонентой от ученых НИИ. Проведение совместных исследований в области почвоведения и растениеводства. Стажировки на опытных станциях. Оснащение учебно-научных лабораторий современной техникой «Ростсельмаш». Полный цикл кадрового обеспечения: от профориентации до трудоустройства
Омский ГАУ (Омск)	Сибирский НИИ сельского хозяйства, Омский аграрный научный центр (Омский АНЦ)	ООО ПСК «Омскдизель», «Ростсельмаш», Петербургский тракторный завод (в рамках широкой сети партнерств)	Холдинг «Велком», ООО «ПРОДО зерно» и др. (более 100 индустриальных партнеров)	Широкая сеть индустриального и научного сотрудничества: проведение практик на опытных полях НИИ, совместные сортоиспытания, модернизация техники с учетом разработок институтов. Активное участие в отраслевых конкурсах (им. А.А. Ежевского). Университет как центральный узел региональной агропромышленной экосистемы
Новые/Сетевые участники экосистемы	Агробiotехнопарк (как площадка для акселерации разработок)	Концерн «РОССПЕЦМАШ» (включая «Ростсельмаш») как стратегический отраслевой партнер многих вузов	Крупнейшие агрохолдинги страны («Мираторг», «ЭкоНива», «Прогресс Агро», «Доминант» и др.)	Отраслевой конкурс для вузов им. А.А. Ежевского, проводимый ассоциацией РОССПЕЦМАШ, для стимулирования инноваций. Создание агробiotехнопарков на базе вузов как центров коммерциализации разработок. Всероссийская отраслевая выставка «Золотая осень» (на базе РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева) как ключевая площадка презентации достижений консорциумов. Открытие специализированных классов и лабораторий, оснащенных техникой ведущих машиностроительных предприятий

партнерств в целостную национальную сеть (консорциум) для подготовки кадров и развития технологий в АПК.

Результаты анализа практики девяти ведущих аграрных вузов подтвердили, что формирование консорциумов базируется на принципах сетевого взаимодействия, направленного на создание бесшовной системы «Генерация знаний – трансфер технологий – внедрение в производство». Исследования выявили, что консорциумы эволюционируют от единичных договоров о сотрудничестве к сложным многоуровневым экосистемам. Это соответствует концепции непрерывного профессионального образования, когда подготовка кадров осуществляется по цепочке «Школа – колледж/вуз – предприятие» с активным включением этапов профориентации, целевого обучения, стажировок и гарантированного трудоустройства.

Таким образом, консорциум выступает как институциональное воплощение интеграции образования, науки и производства, теоретически обоснованной в современных работах по модернизации аграрного образования.

На основе сравнительного анализа более 40 партнерств была разработана типология ключевых

моделей интеграции, отражающая различные стратегические акценты вузов (табл. 2). Модели не являются взаимоисключающими и зачастую комбинируются в практике одного университета.

Представленная типология демонстрирует, как аграрные вузы адаптируют общий формат консорциума под свои стратегические приоритеты, ресурсы и региональную специфику. Анализ публичных соглашений и описаний сотрудничества позволил реконструировать типовые организационные механизмы и четкое распределение ролей между участниками консорциума (табл. 3).

Исследования показали, что ядром договорной базы являются рамочные соглашения, которые детализируются в пакете документов, включающих в себя договоры о целевом обучении, контракты на НИОКР, положения о базовых кафедрах и совместных лабораториях.

Аграрная специфика накладывает отпечаток на построение консорциумов. Длительный производственный цикл, зависимость от природно-климатических условий, территориальная распределенность предприятий обуславливают необходимость создания опытных полигонов (Уральский ГАУ,

Таблица 2

Типология моделей образовательных консорциумов в российском АПК

Table 2

Typology of educational consortium models in the Russian agro-industrial sector

Модель интеграции	Сущность и целевая функция	Ключевые примеры из практики
Системное кадровое партнерство	Фокус на полном цикле подготовки и закрепления кадров для конкретного бизнеса: от целевого набора и именных стипендий до гарантированного трудоустройства	РГАУ-МСХА им. Тимирязева и Агрофирма «Партнер»; Воронежский ГАУ и «ЭкоНива» (агроклассы + целевой прием)
Экспортно-инновационная модель	Сочетание решения внутренних задач АПК с экспортом образовательных и агротехнологий. Вуз выступает как научно-внедренческий хаб с международной проекцией	Кубанский ГАУ: испытания биофунгицида с «Прогресс Агро» и создание агрокласса в Эфиопии с НПП «ГЕНЕЗИС»
Технократическая модель глубокой интеграции	Глубокая материально-техническая и инфраструктурная кооперация. Создание на базе вуза совместных лабораторий, оснащенных партнером, и реализация долгосрочных НИОКР	Уральский ГАУ: брендовые лаборатории с «КРОНЕ Русь» и 5-летняя селекционная программа с «Гавриш»
Цифровая (отраслевая) модель	Концентрация на формировании компетенций для конкретного технологического уклада (цифровизация, роботизация). Вуз становится центром компетенций	Алтайский ГАУ и компания «Хизара» (агродроны); Омский ГАУ как узел сетевого взаимодействия с 100+ партнерами
Регионально-отраслевая экосистема	Формирование широкой сети взаимодействия с доминирующими в регионе агроформированиями и НИИ для комплексного решения задач территории	Ставропольский ГАУ и ГАП «Ресурс»; Дагестанский ГАУ и агрокомпания «Согратл»

Таблица 3

Распределение ролей и ключевые механизмы взаимодействия в консорциуме

Table 3

Distribution of roles and key interaction mechanisms in the consortium

Участник	Ключевые функции	Формализованные механизмы взаимодействия
Университет	Образовательное ядро и интегратор, базовая подготовка кадров, аккумуляция фундаментальных знаний, методическое руководство	Разработка или актуализация образовательных программ под запрос партнеров; создание базовых кафедр на предприятиях; организация практик, стажировок, преддипломной подготовки; научное руководство аспирантами от предприятий
НИИ	Генератор новых знаний и экспертный центр. Проведение прикладных исследований, экспертиза инноваций	Совместные НИОКР в рамках госзаданий и хоздоговоров; создание совместных лабораторий на базе вуза или НИИ; привлечение сотрудников НИИ в качестве преподавателей и экспертов; предоставление опытных полей и инфраструктуры для исследований
Машино-строительное предприятие	Индустриальный исполнитель и инженерный хаб. Конструирование, адаптация и испытания техники	Софинансирование и оснащение учебных лабораторий и центров; формирование технических заданий на разработки; организация промышленных испытаний прототипов; внедрение результатов студенческих проектов
Агрохолдинг	Стратегический заказчик и потребитель. Формулировка актуальных производственных задач, предоставление полигонов, трудоустройство	Участие в наблюдательных/попечительских советах вуза; реализация программ целевой подготовки (стипендии, гарантия трудоустройства); заключение договоров на выполнение НИОКР и внедрение разработок; проведение ярмарок вакансий и карьерных мероприятий
Координирующая структура государство, фонд)	Катализатор, методист и арбитр. Стратегическое планирование, финансирование, оценка эффективности	Рамочные соглашения (на уровне Минсельхоза, региона); «дорожные карты» с конкретными мероприятиями и КРІ; грантовая поддержка (программа «Приоритет-2030»); организация стратегических сессий и рабочих групп

Прогресс Агро) для апробации решений в реальных условиях, акцент на долгосрочных программах (5-10 лет), особенно в селекции и семеноводстве (РГАУ-МСХА им. Тимирязева, ФГБНУ ФНАЦ ВИМ), и на регионализации моделей, когда вузы тесно интегрируются с доминирующими в регионе агроформированиями и НИИ (Дагестанский, Ставропольский ГАУ).

Государственные программы выступают ключевым катализатором процессов интеграции. Программа «Приоритет-2030» предоставляет вузам ресурсы для трансформации и создания инфраструктуры, что делает их привлекательными партнерами для бизнеса. Национальные проекты в сфере АПК и образования формируют общий стратегический контекст и задают приоритеты (импортозамещение, технологический суверенитет), под которые выстраивается логика конкретных консорциумов. Однако, как отмечено в исследованиях, реализация

нацпроектов порождает управленческие сложности, требующие от участников консорциумов высокой слаженности и адаптивности.

Выводы

Образовательные консорциумы «Аграрный вуз – НИИ – машиностроительное предприятие – агрохолдинг» представляют собой формирующуюся систему с четкой типологией моделей, отработанными договорными механизмами и распределением ролей. Их архитектура напрямую зависит от региональной специфики и стратегических ориентиров вуза, но всегда направлена на преодоление разрыва между теорией и практикой. Государственная поддержка через программы развития выступает как необходимое условие их масштабирования и трансформации в устойчивые саморазвивающиеся экосистемы, непосредственно влияющие на кадровое и технологическое обеспечение агропромышленного комплекса России.

Список источников

1. Давыдова Н.Н., Кубрушко П.Ф., Федоров В.А. Сетевое взаимодействие образовательных организаций и производственных предприятий в подготовке кадров: теоретико-методологический аспект // Международный журнал аграрной науки и образования. 2025. № 1 (5). С. 119-124. EDN: JANZVQ
2. Ерохин М.Н., Дорохов А.С. Становление и развитие агроинженерной науки и образования в РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». 2015. № 2 (66). С. 58-63. EDN: TYFWTF
3. Кубрушко П.Ф., Шингарева М.В., Атапина Ю.А. Подготовка кадров для агропромышленного комплекса в системе непрерывного профессионального образования // Агроинженерия. 2022. Т. 24, № 4. С. 58-63. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-4-58-63>
4. Лачуга Ю.Ф., Лобачевский Я.П., Алферов А.А. Сельскохозяйственная наука в развитии агропромышленного комплекса Российской Федерации // Вестник Российской академии наук. 2025. Т. 95, № 6. С. 3-8. <https://doi.org/10.7868/S3034520025060019>
5. Лобачевский Я.П. Научное обеспечение приоритетных технологий агропромышленного комплекса Российской Федерации // Вестник Российской академии наук. 2024. Т. 94, № 3. С. 275-282. <https://doi.org/10.31857/S0869587324030102>
6. Катков Ю.Н., Качалов В.В., Деркачев П.В. Модернизации модели аграрного университета на основе современных трендов развития агропромышленного комплекса // АПК: экономика, управление. 2024. № 2. С. 25-37. EDN: BCERZT
7. Федоров В.А., Третьякова Н.В., Тюрина Г.А. Организация взаимодействия колледжа с социальными партнерами в интегрированной образовательно-производственной среде при подготовке квалифицированных рабочих // Профессиональное образование и рынок труда. 2024. Т. 12, № 3. С. 100-117. <https://doi.org/10.52944/PORT.2024.58.3.007>
8. Пахомов С.И., Петров М.П., Лобачевский Я.П. и др. Результативность института аспирантуры в контексте комплексного регулирования процесса подготовки научно-педагогических кадров: современное состояние и необходимость новых подходов // Управление наукой и наукометрия. 2024. Т. 19, № 2. С. 242-295. <https://doi.org/10.33873/2686-6706.2024.19-2.242-295>
9. Войтюк В.А., Кондратьева О.В., Слинько О.В., Чутчева Ю.В. Пути повышения конкурентоспособности аграрных предприятий в эпоху импортозамещения // АгроЭкоИнженерия. 2024. № 4 (121). С. 17-29. EDN: NRDTGT
10. Коротченя В.М. Научно-технический прогресс и стратегия инновационного развития сельского хозяйства // Экономика сельского хозяйства России. 2024. № 2. С. 14-20. EDN: CLYACO
11. Каминская Т.Л., Петросянц Д.В., Симонов К.В. и др. Национальные проекты России как имиджевая проблема управления // Экономика. Налоги. Право. 2023. Т. 16, № 4. С. 17-34. EDN: RBVUZX
12. Пряжников Н.С., Пряжникова Е.Ю., Молчанов С.В. и др. Совесть и здравый смысл в общей структуре «модели специалиста» // Организационная психология. 2024. Т. 14, № 2. С. 170-191. EDN: WVMITF
13. Полевая М.В. Особенности профессионализации и социализации молодежи в условиях инновационных

References

1. Davydova N.N., Kubrushko P.F., Fedorov V.A. Networking of educational organizations and industrial enterprises in personnel training: theoretical and methodological aspect. *International Journal of Agricultural Science and Education*. 2025;1:119-124. (In Russ.)
2. Erokhin M.N., Dorokhov A.S. Establishment and evolution of agroengineering science and education in Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy. *Vestnik of Federal State Educational Institution of Higher Professional Education “Moscow State Agroengineering University named after V.P. Goryachkin”*. 2015;2:58-63. (In Russ.)
3. Kubrushko P.F., Shingareva M.V., Atapina Yu.A. Agricultural staff training in the system of lifelong professional education. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2022;24(4):58-63. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-4-58-63>
4. Lachuga Yu.F., Lobachevsky Ya.P., Alferov A.A. Agricultural science in the development of the agro-industrial complex of the Russian Federation. *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2025;95:95(6):3-8 (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S3034520025060019>
5. Lobachevsky Ya.P. Scientific support of priority technologies agro-industrial complex of the Russian Federation. *Vestnik Rossiiskoi akademii nauk*. 2024;94(3):275-282. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0869587324030102>
6. Katkov Yu.N., Kachalov V.V., Derkach P.V. Modernization of the agrarian university model based on modern trends in the development of the agro-industrial complex. *AIC: Economics, Management*. 2024;2:25-37. (In Russ.)
7. Fedorov V.A., Tret'yakova N.V., Tyurina G.A. Organisation of college interaction with social partners in an integrated educational-production environment for training qualified workers. *Vocational Education and Labour Market*. 2024;12(3):100-117. (In Russ.) <https://doi.org/10.52944/PORT.2024.58.3.007>
8. Pakhomov S.I., Petrov M.P., Lobachevskii Ya.P. et al. Effectiveness of the postgraduate education institution in the context of comprehensive regulation of academic and teaching staff training: the current status and need for new approaches. *Science Governance and Scientometrics*. 2024;19(2):242-295. <https://doi.org/10.33873/2686-6706.2024.19-2.242-295>
9. Voytyuk V.A., Kondratieva O.V., Slinko O.V., Chutcheva Yu.V. Ways to improve the competitiveness of agricultural enterprises in the era of import substitution. *AgroEkoInzheneriya*. 2024;4:17-29. (In Russ.)
10. Korotchenya V.M. Scientific and technological progress and the innovation strategy for agriculture. *Economics of Agriculture of Russia*. 2024;2:14-20. (In Russ.) <https://doi.org/10.32651/242-14>
11. Kaminskaya T.L., Petrosyants D.V., Simonov K.V., Seleznev P.S., Kupriyanova L.M. National projects of Russia as an image management problem. *Economics, Taxes & Law*. 2023;16(4):17-34. (In Russ.) <https://doi.org/10.26794/1999-849X-2023-16-4-17-34>
12. Pryazhnikov N.S., Pryazhnikova E.Yu., Molchanov S.V. et al. Conscience and common sense in the overall structure “specialist model”. *Organizatsionnaya Psikhologiya*. 2024;14(2):170-191. (In Russ.)
13. Poleyaya M.V. Features of professionalization and socialization of youth in the conditions of innovative transformations. *Economics, Taxes & Law*. 2023;16(2):19-27. (In Russ.) <https://doi.org/10.26794/1999-849X-2023-16-2-19-27>
14. Molchanov L.N. Education and professional training as tools for the formation of human

преобразований // Экономика. Налоги. Право. 2023. Т. 16, № 2. С. 19-27. <https://doi.org/10.26794/1999-849X-2023-16-2-19-27>

14. Молчанов И.Н. Образование и профессиональная подготовка как инструменты формирования человеческого капитала // Экономика. Налоги. Право. 2023. Т. 16, № 2. С. 108-118. <https://doi.org/10.26794/1999-849X-2023-16-2-108-118>

15. Молчанов И.Н. Образование как социальный институт: предпринимательский вектор // Экономика. Налоги. Право. 2022. Т. 15, № 5. С. 38-46. <https://doi.org/10.26794/1999-849X-2022-15-5-38-46>

16. Фаттахов Р.В., Низамутдинов М.М., Пивоварова О.В. и др. Прогнозирование социально-экономического развития муниципального образования: бюджетный аспект // Финансы: теория и практика. 2023. Т. 27, № 3. С. 79-91. <https://doi.org/10.26794/2587-5671-2022-27-3-79-91>

Информация об авторе

^{1,2} **Бережная Мария Сергеевна**, д-р пед. наук, профессор; bebsiconsult@mail.ru; SPIN-код: 8247-2364; <https://orcid.org/0000-0001-5325-8302>

¹ Финансовый университет при Правительстве РФ, кафедра психологии и развития человеческого капитала; 125167, Российская Федерация, г. Москва, Ленинградский пр-кт, 49/2

² ФГБНУ «Институт содержания и методов обучения имени В.С. Леднева», лаборатория научных основ исследовательской и экспериментальной деятельности; 101000, Российская Федерация, г. Москва, ул. Жуковского, 16

Статья поступила 11.01.2026, после рецензирования 02.04.2026, принята к публикации 03.04.2026

capital. *Economics, Taxes & Law*. 2023;16(2):108-118. (In Russ.) <https://doi.org/10.26794/1999-849X-2023-16-2-108-118>

15. Molchanov I.N. Education as a social institution: an entrepreneurial vector. *Economics, Taxes & Law*. 2022;15(5):38-46. (In Russ.) <https://doi.org/10.26794/1999-849X-2022-15-5-38-46>

16. Fattakhov R.V., Nizamutdinov M.M., Pivovarova O.V., Oreshnikov V.V., Stroeve P.V. Forecasting the socio-economic development of the municipality: The budgetary aspect. *Finance: Theory and Practice*. 2023;27(3):79-91. <https://doi.org/10.26794/2587-5671-2022-27-3-79-91>

Author Information

Maria S. Berezhnaia^{1,2}, DSc (Ed), Professor; bebsiconsult@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5325-8302>; Scopus ID: 56530704500

¹ Financial University under the Government of the Russian Federation, Department of Psychology and Human Capital Development, Moscow, Russia, 125167, Moscow, 49/2 Leningradsky Ave.

² Institute for Content and Methods of Education named after V.S. Lednev, Laboratory of Scientific Foundations of Research and Experimental Activity; Russia, Moscow, 101000, Central Federal District, Moscow, 16 Zhukovskogo Str.

Received 11.01.2026; Revised 02.04.2026; Accepted 03.04.2026