



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

АГРОИНЖЕНЕРИЯ

Научный журнал

Том 28. № 1 / 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 12.02.2026
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. Будако, 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, 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.auramenka@bsatu.by

Снежан Иванов Божков, канд. техн. наук, проф., Институт почвоведения, агротехнологий и защиты растений им. Н. Пушкарлова, 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(1)/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 12.02.2026

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>, oaleonov@rgau-msha.ru

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Quang Hoang Duc, PhD (Chem), Russian-Vietnamese Tropical Research and Technology Centre (Ho Chi Minh, Vietnam), <https://orcid.org/0000-0002-6487-8782>, quanghoang1510@gmail.com

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ АПК

С.Г. Мударисов, И.Р. Мифтахов, И.М. Фархутдинов Количественная оценка поражения сахарной свеклы церкоспорозом на основе мультиспектральной съемки с БПЛА и сегментации методом U-Net.....	4
А.С. Дорохов, В.В. Кирсанов, Р.А. Баишева, С.В. Кирсанов Искусственный интеллект в управлении животноводческой фермой.....	16
И.В. Петухов, Л.А. Стешина, И.С. Стешин Интеллектуализация технологических систем агропромышленного комплекса: Индустрия 4.0.....	26
Т.Е. Алушкин, М.Ю. Мещеряков, А.В. Старцев Использование нейронных сетей в технической эксплуатации самоходных машин.....	36
А.Ю. Несмиян, А.Г. Арженовский, В.И. Хижняк, К.П. Дубина Анализ размерных характеристик семян кукурузы и подсолнечника.....	44
Н.П. Аюгин, С.А. Яковлев, А.С. Кузин, И.А. Калашников К определению угла заточки лезвий ножей измельчителей кормов, работающих в условиях абразивного изнашивания.....	54
Ю.А. Широков, Р.Н. Егоров, Н.А. Мочунова, Г.Е. Митягин Методические особенности оценки профессиональных рисков трактористов-машинистов.....	64

ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕРВИС В АПК

О.А. Леонов, Н.Ж. Шкаруба, Ю.Г. Вергазова, Д.О. Леонов Оценка точности и достоверности результатов приемо-сдаточных испытаний двигателей ЗМЗ.....	73
П.В. Голиницкий, У.Ю. Антонова, Д.А. Пупкова Обоснование целесообразности замены аналоговых средств измерений цифровыми на ремонтных предприятиях.....	80

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

М.В. Беляков Идентификация сортов семян сои спектральным люминесцентным методом.....	87
В.Т. Водяников Применение на птицефабрике биоэнергетической установки в качестве нетрадиционного источника энергии.....	97
А.К. Букреева, А.В. Виноградова, А.В. Букреев, А.В. Виноградов Актуальные направления применения искусственного интеллекта в сельских электрических сетях.....	105

ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

Н.Б. Авалуева, Д.И. Михайлова Персонализированные стратегии развития лично-профессиональной зрелости будущих специалистов агропромышленного комплекса.....	114
--	-----

CONTENTS

FARM MACHINERY AND TECHNOLOGIES

S.G. Mudarisov, I.R. Miftakhov, I.M. Farkhutdinov Quantitative assessment of sugar beet Cercospora infection based on UAV multispectral imaging and U-Net segmentation.....	4
A.S. Dorokhov, V.V. Kirsanov, R.A. Baisheva, S.V. Kirsanov Use of artificial intelligence for managing a livestock farm.....	16
I.V. Petukhov, L.A. Steshina, I.S. Steshin Intellectualization of technological systems in agriculture: Industry 4.0.....	26
T.E. Alushkin, M.Y. Meshcheryakov, A.V. Startsev Use of neural networks in the technical operation of self-propelled machinery.....	36
A.Yu. Nesmiyan, A.G. Arzhenovskiy, V.I. Khizhnyak, K.P. Dubina Analysis of dimensional characteristics of maize and sunflower seeds.....	44
N.P. Ayugin, S.A. Yakovlev, A.S. Kuzin, I.A. Kalashnikov On determining the sharpening angle of knife blades used in feed grinders operating under conditions of abrasive wear.....	54
Yu.A. Shirokov, R.N. Egorov, N.A. Mochunova, G.E. Mityagin Methodological features of professional risk assessment of tractor drivers.....	64

TECHNICAL SERVICE IN AGRICULTURE

O.A. Leonov, N.Zh. Shkaruba, Yu.G. Vergazova, D.O. Leonov Evaluation of the accuracy and reliability of the acceptance test results for ZMZ engines.....	73
P.V. Golinitzkiy, U.Yu. Antonova, D.A. Pupkova Justification for the feasibility of replacing analog measuring instruments with digital ones at repair enterprises.....	80

POWER SUPPLY AND AUTOMATION OF AGRICULTURAL PRODUCTION

M.V. Belyakov Identification of soybean seed varieties by spectral luminescence method.....	87
V.T. Vodyannikov Application of a bioenergy plant as an alternative energy source at a poultry farm.....	97
A.K. Bukreeva, A.V. Vinogradova, A.V. Bukreev, A.V. Vinogradov Current applications of artificial intelligence in rural power grids.....	105

THEORY AND METHODOLOGY OF PROFESSIONAL EDUCATION

N.B. Avalueva, D.I. Mikhailova Personalized strategies for developing personal and professional maturity of future specialists in the agro-industrial sector.....	114
---	-----

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ АПК

ORIGINAL ARTICLE

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-1-4-15>**Quantitative assessment of sugar beet *Cercospora* infection based on UAV multispectral imaging and U-Net segmentation****S.G. Mudarisov^{1✉}, I.R. Miftakhov², I.M. Farkhutdinov³**^{1,2,3} Bashkir State Agrarian University; Ufa, Russia¹ salavam@gmail.com✉; <https://orcid.org/0000-0001-9344-2606>² info323@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3125-3532>³ ildar1702@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6443-8584>

Abstract. *Cercospora* leaf spot (CLS) of sugar beet, caused by *Cercospora beticola* Sacc., is a highly destructive plant disease that can reduce yields by up to 40% and significantly impair root crop quality. This study aimed to develop and validate a quantitative disease assessment method utilizing UAV-based multispectral imaging and semantic segmentation. Field trials were conducted in 2023-2024 on commercial sugar beet crops (Agrofirma Start OOO, Buzdyak District, Republic of Bashkortostan). Plots, measuring 20 × 6 rows (≈21.6 m²), included both control and artificially inoculated treatments. UAV imagery was acquired using a Geoscan ChatGPT equipped with a Pollux multispectral camera (Blue, Green, Red, Red-edge, NIR) at an altitude of approximately 30 m. A U-Net model was trained on 420 annotated image tiles (512 × 512 px), using a 6:2:2 split for training, validation, and testing. The model incorporated spectral indices (NDVI, NDRE, MCARI, NSVDI) in addition to geometric features derived from the normal vectors of a Digital Surface Model (DSM). The developed integrative algorithm achieved an overall multiclass classification accuracy of 88.6%. Specifically, an F1-score of 46.0% was obtained for the ‘infected plants’ class, outperforming Partial Least Squares Discriminant Analysis (PLS-DA) by 18.6 percentage points. F1-scores reached 92.5% for ‘Healthy vegetation’ and 68.7% for ‘Soil/Background.’ This methodology confirms the strong applicability of U-Net for the diagnostic segmentation of *Cercospora* outbreaks, significantly enhancing the objectivity of crop monitoring. The integration of spectral and geometric features proved crucial in improving the detection of weakly expressed disease symptoms.

Keywords: *Cercospora*; sugar beet; multispectral imaging; UAV; segmentation; U-Net; precision agriculture; phytopathology; NDVI index; machine learning

Funding. The research reported in this article was implemented as part of the strategic academic leadership program “Priority-2030,” carried out by Bashkir State Agrarian University.

For citation: Mudarisov S.G., Miftakhov I.R., Farkhutdinov I.M. Quantitative assessment of sugar beet *Cercospora* infection based on UAV multispectral imaging and U-Net segmentation. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(1):4-15 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-1-4-15>

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.34:004.896

Количественная оценка поражения сахарной свеклы церкоспорозом на основе мультиспектральной съемки с БПЛА и сегментации методом U-Net**С.Г. Мударисов^{1✉}, И.Р. Мифтахов², И.М. Фархутдинов³**^{1,2,3} Башкирский государственный аграрный университет; г. Уфа, Россия¹ salavam@gmail.com✉; <https://orcid.org/0000-0001-9344-2606>² info323@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3125-3532>³ ildar1702@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6443-8584>

Аннотация. Церкоспороз сахарной свеклы (*Cercospora beticola* Sacc.) является одной из наиболее вредоносных фитопатологий, снижает урожайность до 40% и ухудшает качество корнеплодов. Цель исследований – разработка и верификация метода количественной оценки поражения на основе

мультиспектральной аэрофотосъемки и семантической сегментации. Испытания проводились на производственных посевах ООО «Агрофирма "Старт"» (Буздякский район, Республика Башкортостан) в 2023-2024 гг., на делянках 20×6 рядов ($\approx 21,6 \text{ м}^2$) с контрольными и инокулированными вариантами. Съемка выполнялась БПЛА Geoscan Gemini с камерой Pollux (Blue, Green, Red, Red-edge, NIR) при высоте $\sim 30 \text{ м}$. Модель U-Net обучена на 420 размеченных фрагментах ($512 \times 512 \text{ px}$; 6:2:2), дополнительно использованы индексы NDVI, NDRE, MCARI, NSVDI и геометрические признаки нормалей ЦМП. Интегративный алгоритм обеспечил точность мультиклассовой классификации 88,6%. Для класса «Пораженные растения» получена F1-метрика 46,0%, что на 18,6 п.п. выше PLS-DA. Значения F1 составили 92,5% для растений «Здоровые» и 68,7% – для категории «Почва/фон». Методика подтверждает применимость U-Net для диагностической сегментации очагов церкоспороза и повышает объективность мониторинга посевов. Интеграция спектральных и геометрических признаков улучшает выявление слабовыраженных симптомов.

Ключевые слова: церкоспороз; сахарная свекла; мультиспектральная съемка; БПЛА; сегментация; U-Net; точное земледелие; фитопатология; индекс NDVI; машинное обучение

Финансирование. Материалы, представленные в статье, получены в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030», реализуемой ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ.

Для цитирования: Мударисов С.Г., Мифтахов И.Р., Фархутдинов И.М. Количественная оценка поражения сахарной свеклы церкоспорозом на основе мультиспектральной съемки с БПЛА и сегментации методом U-Net // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 1. С. 5-15. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-1-5-15>

Introduction

Sugar beet (*Beta vulgaris L.*) is a valuable agricultural crop, the yield of which significantly decreases when infected with Cercospora leaf spot. Cercospora leaf spot (*Cercospora beticola* Sacc.) is a fungal infection that causes leaf spotting and leads to approximately 40% yield losses [1]. Conventionally, agronomists visually monitor disease spread in field conditions; however, this approach is labor-intensive, non-objective, and cannot rapidly cover large areas [2]. In the initial stages, disease symptoms can be weakly expressed and imperceptible to the naked eye, complicating timely diagnosis and resort to crop protection measures [3]. As part of integrated crop protection, farmers need to promptly detect the emergence and spread of infection to take timely action and reduce yield losses.

Modern remote sensing technologies enable early diagnosis of phytopathologies. Unmanned aerial vehicles (UAVs) provide highly detailed images of large areas in a short time. In combination with machine learning methods, they can automatically detect plant diseases at early stages and objectively assess crop infestation levels [4, 5, 6]. Multispectral imaging provides data in the visible, red-edge, and near-infrared (NIR) ranges, which are sensitive to the physiological state of plants [7]. A decrease in NDVI is known to occur before the visual symptoms of Cercospora manifest themselves; so reflection in the red-edge region (around 700 nm) significantly enhances the contrast between healthy and affected vegetation [2].

Deep learning methods and convolutional neural networks (CNNs) provide for reliable classification

of phytopathologies based on their images [5]. Semantic segmentation allows for dividing an image into pixels of the classes “infected leaf areas,” “healthy leaf mass,” and “background” [8], providing quantitative estimates of the affected area [9, 10]. Automatic segmentation of Cercospora leaf spot in aerial images has proved to be comparable to visual assessments by phytopathologists [10, 11]. This technique can generate disease distribution maps and determine the affected surface area [12]. Therefore, the research aimed to develop a method for the quantitative assessment of Cercospora leaf spot infection in sugar beet based on UAV multispectral data and the U-Net architecture for semantic segmentation. The authors hypothesize that the combination of highly detailed multispectral aerial images and a U-Net segmentation model will provide accurate detection of Cercospora spots on leaves in field conditions and enable precise measurement of the affected area. This approach aims to automate disease monitoring in sugar beet crops and provide agronomists and breeders with a tool for rapid decision-making in crop protection systems.

Research Objective: To develop and experimentally verify a methodology for the quantitative assessment of Cercospora leaf spot infection in sugar beet using multispectral aerial photography from unmanned aerial vehicles and semantic segmentation algorithms.

Materials and Methods

Commercial field trials for monitoring Cercospora leaf spot (*Cercospora beticola* Sacc.) infection in sugar

beet were conducted in 2023 on the premises of the agricultural enterprise *Agrofirma Start*, ООО (Buzdyak District, Republic of Bashkortostan, coordinates 54°34'02" N, 54°33'10" E). The field experiment was based on a two-factor design: 1) sugar beet variety; 2) treatment strategy (control, no fungicide; control with fungicide; infected without treatment) with three replications (blocks) for each variant.

Two sugar beet varieties (*Beta vulgaris subsp. vulgaris*) were used in the experiments: the first (registration number RU2018.0012) featured resistance to *Cercospora* leaf spot, while the second was susceptible to the disease. A seeder was used to plant six-row plots, each 20 m long with a row spacing of 45 cm. The total area of each treatment variant was approximately 21.6 m².

The crops were inoculated by uniformly applying pre-dried and ground infected leaf material, prepared according to the prescribed technique [13], at a concentration of 4 g/m². Fungicide treatments were applied upon the first appearance of disease symptoms and once again if symptoms reappeared, following the local plant protection product (PPP) regulations. Totally, the fungicide was applied up to four times during the growing season.

At the harvest stage, yield and root quality were assessed. Root crops were washed, ground, and analyzed for dry matter, sugar, potassium, sodium, and α -amino nitrogen content. Using standard equations accepted in agrochemical practice, sugar yield (WSY) and sugar

yield losses due to *Cercospora* infection (WSY_loss) were determined.

The experiment was repeated in 2024 using a similar design, but with refined infection load and an expanded range of varieties. Throughout the entire growing season, starting from the crop-row closing phase, UAVs were employed to make multispectral aerial photos. The captured images were utilized for both visual monitoring and subsequent automatic segmentation of affected spots using the U-Net model. Experiments were carried out in clear weather conditions, with an average air temperature of 24-27°C, a relative humidity of 65-70%, and without strong wind. Soil moisture during image taking ranged approximately between 18 and 22%. No imaging was taken when dew or rain droplets were present on leaves, to prevent additional spectral distortions. Illumination conditions were recorded using a light sensor and a radiometric panel to ensure accurate image calibration.

Orthophotos were processed using Agisoft Metashape Professional v1.6.3 (64-bit). The U-Net model was trained in a Python 3.10 environment, utilizing TensorFlow 2.12 and Keras 2.11.0 libraries. Processing was performed on a workstation equipped with an NVIDIA RTX 3080 GPU (10 GB VRAM), an Intel i9-12900K CPU, and 64 GB RAM. These specifications were applied to training the model over 100 epochs, with an average processing time of approximately 0.45 s per batch.

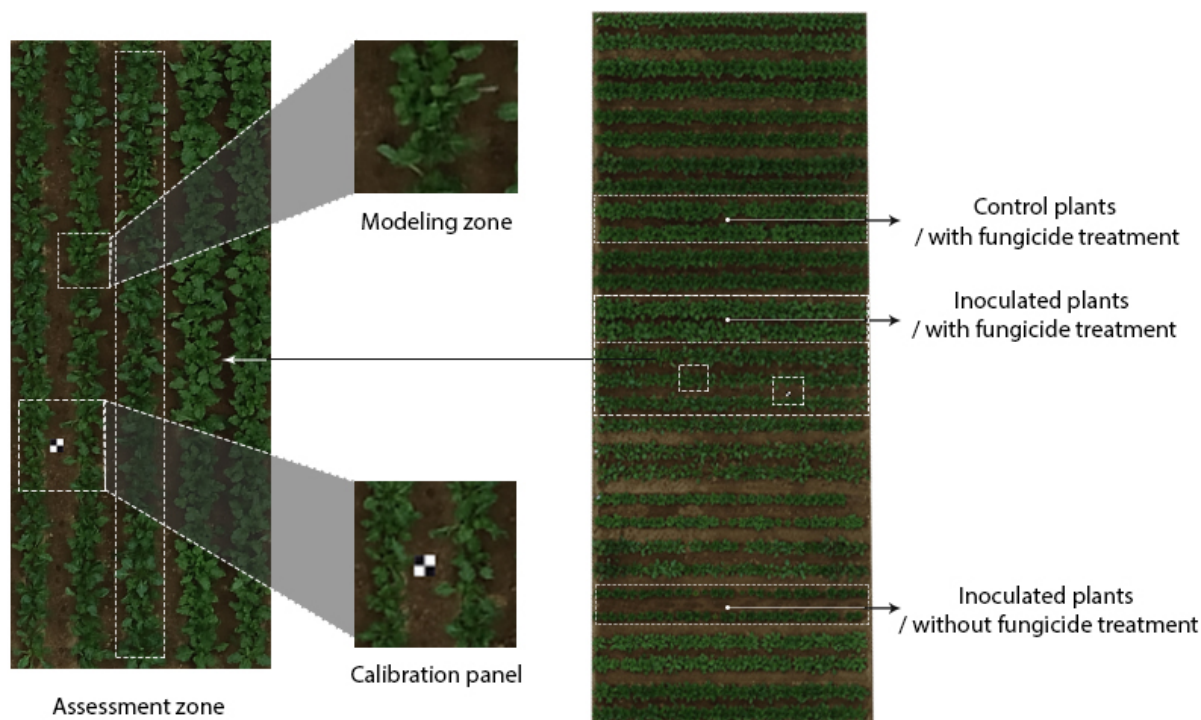


Fig. 1. Structure of the experimental plot, plant infection assessment zones, and data collection zones for calibration and modeling*

* Multispectral images obtained from a Geoscan ChatGPT UAV (Geoscan Pollux multispectral camera), August 2024.

A Geoscan ChatGPT UAV, equipped with a Geoscan Pollux multispectral camera, was used for aerial photography. This camera simultaneously captures images across five spectral bands: blue, green, red, red-edge, and near-infrared (NIR) (Table 1).

Imaging was performed from a height of 30 m with approximately 80% longitudinal and lateral overlap, ensuring a resolution of several centimeters per pixel. This resolution was sufficient to detect individual leaves and disease spots. Multispectral images were radiometrically calibrated using standard reflectance panels and then stitched into orthomosaics [14]. For analysis, 512×512 pixel tiles were extracted from the orthomosaics.

Radiometric calibration followed a two-stage procedure: first, raw data were converted to radiance values, accounting for exposure and vignetting; then, these values were normalized to reflectance coefficients using a calibration panel and a light sensor. Orthorectification was performed in Agisoft Metashape Professional (v1.6.3), and the Digital Surface Model (DSM) was generated using stereomatching. Orthomosaics were exported as GeoTIFF files and referenced to the WGS84 coordinate system (EPSG:4326).

To enhance the informativeness for U-Net model training, in addition to the raw spectral channels, the following additional spectral indices were calculated [15]:

– brightness difference between red and blue channels, $D678/500$

– chlorophyll index in the red region, $MCARI$

– modified simple ratio index, MSR

– green vegetation index, GVI

– Saturation Index based on the HSV scale, $NSVDI$.

The representation used is in the HSV color space:

$$V = \max(R, G, B)$$

$$S = \frac{\max(R, G, B) - \min(R, G, B)}{\max(R, G, B)}$$

$$NSVDI = \frac{S - V}{S + V},$$

where R, G, B are the brightness values in the corresponding channels (normalized reflectances).

To account for the influence of observation geometry and surface slope, we used a digital surface model (DSM), constructed from the multispectral orthophoto. For each pixel, the surface normal was determined using the triangle method, formed by four adjacent points. Directional vectors were calculated as follows [16]:

$$\begin{cases} \vec{a} = (1, 0, \Delta z_x), & \Delta z_x = z_{i+1,j} - z_{i,j} \\ \vec{b} = (1, 0, \Delta z_y), & \Delta z_y = z_{i+1,j} - z_{i,j} \end{cases}$$

where $z_{i+1,j}$ is the height at point (i, j) on the DSM; Δz_x is the height change along the x-axis; Δz_y is the change along the y-axis; and $\vec{a}$ and $\vec{b}$ are vectors along adjacent pixels.

$$\vec{n}_{ij} = \vec{a} \times \vec{b}.$$

The above-given formula for the cross product of $\vec{a}$ and $\vec{b}$ yields the normal vector $\vec{n}_{ij}$, which is perpendicular to the local surface of the plant leaf. It is important to note that the direction of the normal helps understand the slope of the area, while the length of the normal is proportional to the area of the parallelogram formed by vectors $\vec{a} \times \vec{b}$.

Next, the vector is normalized:

$$\hat{n}_{ij} = \frac{\vec{n}_{ij}}{|\vec{n}_{ij}|}.$$

The normal is divided by its length to obtain a unit vector, which is necessary for calculating slope and illumination angles.

Based on the calculated normal and the solar position vector $\vec{Z}$, the angle between the surface and the solar ray is determined:

$$\zeta = \arccos(\vec{Z} \cdot \hat{n}_{ij}),$$

where $\vec{Z} = (0, 0, 1)$ is the vertical upward vector.

The surface normals and illumination angles were calculated to account for geometric and shadow effects during radiometric image correction and were used as spatial features during the training of the segmentation model.

Camera's spectral bands for vegetation status assessment

Table 1

Spectral Band	Center Wavelength, nm	Purpose
Blue	475	Indicator of anthocyanin pigments and b-chlorophyll
Green	560	Assessment of overall photosynthetic response
Red	668	Diagnostics of a-chlorophyll content
Red-Edge (RE)	717	Sensitivity to stress and early stages of diseases
Near-Infrared (NIR)	840	Assessment of leaf area density and biomass

For training and evaluating the algorithm, 420 images (orthoimage fragments) were annotated by classifying pixels into three categories: 1) infected leaf areas with *Cercospora* symptoms; 2) healthy leaf surface; 3) background (soil and other objects) (Fig. 2). The annotation was performed manually by expert phytopathologists using software for segmentation mask generation in the LabelMe environment. The resulting dataset was divided into training, validation, and testing sets in a 6:2:2 ratio. The training set included images with known disease pixel masks, and the test set was used to independently assess the model accuracy.

To compensate for class imbalance and accelerate training, 15,000 pixels were randomly sampled from over 1 million pixels, considering the minimum frequency of class occurrences. Balancing was achieved through stratified sampling.

During the comparative testing phase, the following classification algorithms were considered [17]:

- k-nearest neighbors (KNN)
- partial least squares discriminant analysis (PLS-DA)
- random forest
- support vector machines with a linear kernel (SVM-lin)
- support vector machines with a radial basis function kernel (SVM-RBF).

For all models, use was made of repeated cross-validation, internal balancing, and hyperparameter optimization based on minimizing classification error. The following features were employed:

- SB (simple band values) – reflectance in all spectral bands;

– VI (vegetation indices) – NDVI, NDRE, MSR, MCARI, etc.;

– SH (shadow features) – shadows and heterogeneity based on NSVDI;

– DSMv (digital surface model vectors) – surface normals based on DSM data.

During the pipeline construction, it was found that the PLS-DA method showed the best accuracy in multiclass categorization. The output binary array H' , corresponding to the “Healthy” class, was used as an initial filter. If the healthy leaf area was less than 40% ($FCi < 40\%$), a second classifier was activated, refining the pixel assignment to the “Soil,” “Infected,” or “Other” classes.

The final procedure involved binarizing the classification result for each of the four classes. For infected vegetation, the following rule was used:

$$D_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{if } output_{i,j} \in \text{“Infected”} \\ 0, & \text{or} \end{cases}$$

Masks were combined using disjunction and exclusion operations to form three final layers, $S_{i,j}$, $D_{i,j}$, $H_{i,j}$, reflecting the classes “Other and Soil,” “Infected,” and “Healthy,” respectively.

The U-Net neural network architecture was chosen as the semantic segmentation algorithm, having proven effective in segmenting biomedical and agricultural images. U-Net is an encoder-decoder type convolutional network with skip connections, which performs pixel-wise classification based on local and contextual image features [17]. The model input consisted of multispectral data, with reflectance values

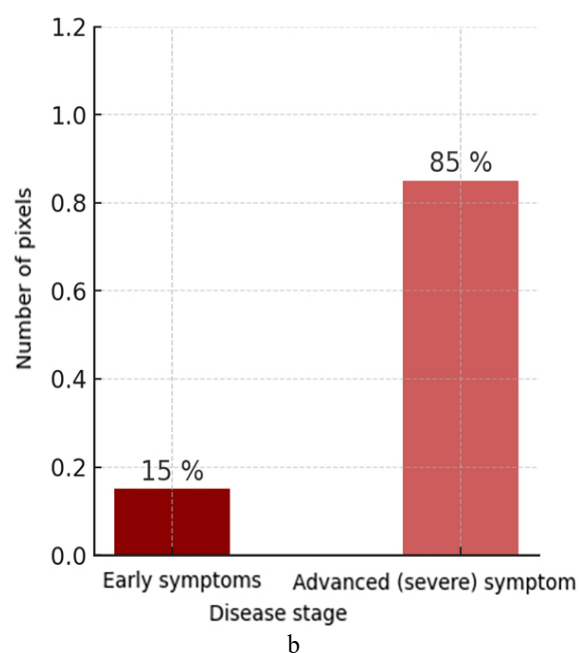
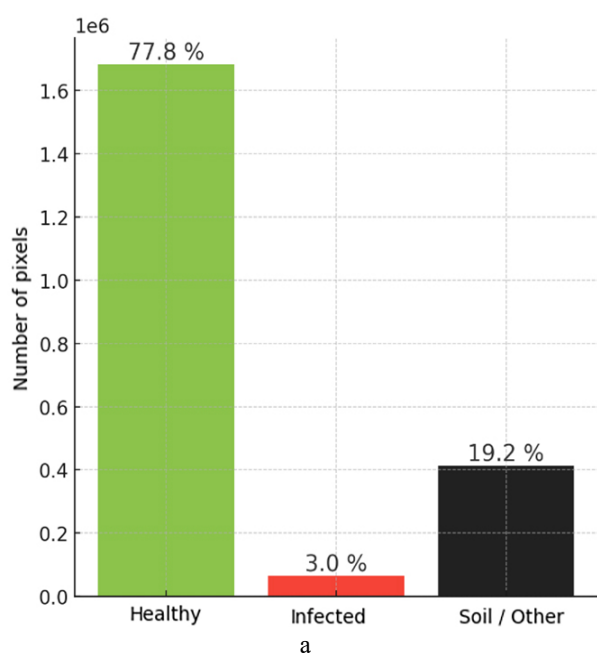


Fig. 2. Distribution of pixel annotations by class and disease stage:

a – healthy plants, infected spots, and other; b – initial stage of phytopathological infection and pronounced symptoms

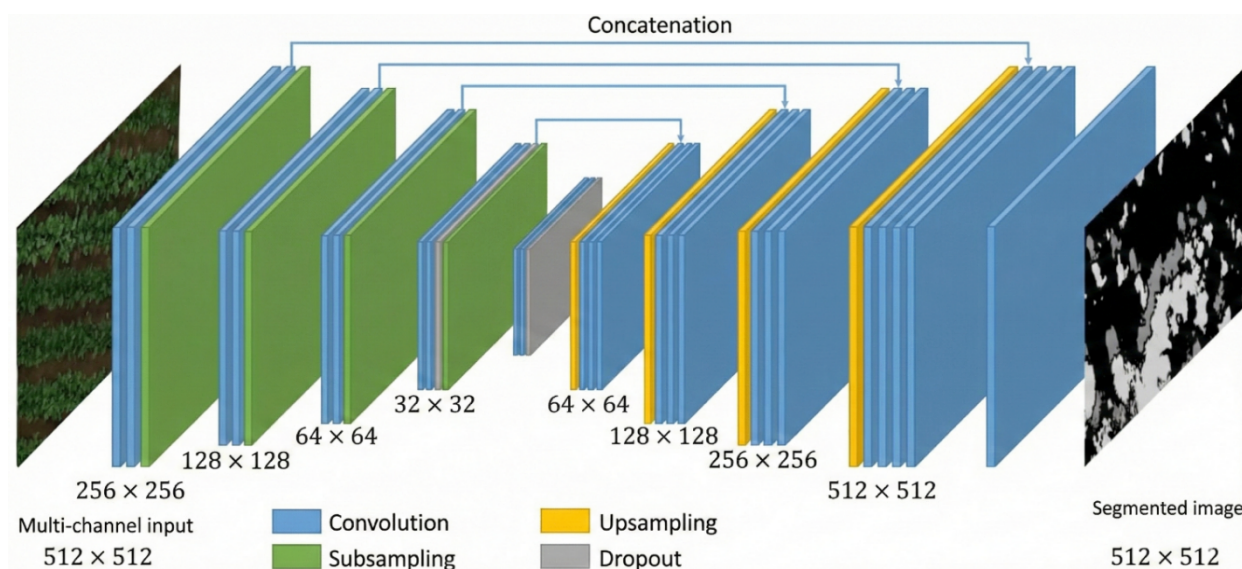


Fig. 3. Architecture of a modified U-Net for segmenting crop phytopathology features

in five spectral channels (corresponding to the bands of the Geoscan Pollux multispectral camera) used for each pixel. The input tensor had a dimensionality of $512 \times 512 \times 5$.

The U-Net architecture progressively reduces spatial resolution to extract high-level features and then restores detail by combining features from different scales for precise localization of affected areas. The output layer generates three probability channels for the classes: “Cercospora,” “Healthy leaves,” and “Background.” For training, the Dice Loss function, which is robust to class imbalance, and the Adam optimizer (learning rate = 0.0001) were used. The model was trained for 100 epochs with a batch size of eight images, employing early stopping based on a validation metric.

To identify phytopathological features, multispectral UAV data were subject to integrated processing. Figure 4 illustrates the analysis workflow, ranging from the formation of spectral channels to the construction of the final plant status map.

The processing workflow involves the formation of multichannel images in the Blue, Green, Red, Red-edge, and NIR bands, which provide spectral sensitivity to the physiological and morphological states of the plants. Based on these, an orthomosaic is constructed with photogrammetric correction and georeferencing, ensuring the spatial consistency of the data across the field. For classification, use is made of a Support Vector Machine with a radial basis function kernel (SVMR), which categorizes pixel values into “Healthy Vegetation,” “Stress Zones,” and “Background.” The output consists of binary masks for affected vegetation (D_{ij}), shadowed areas (S_{ij}), and zones of high photosynthetic activity (H_{ij}), which are merged into the final phytomass status map. This approach enables the discriminatory mapping of disease outbreaks and supports management decisions in precision farming systems. Its effectiveness stems from the high information content of multispectral data, the adaptability of machine learning, and its scalability to the level of production fields.

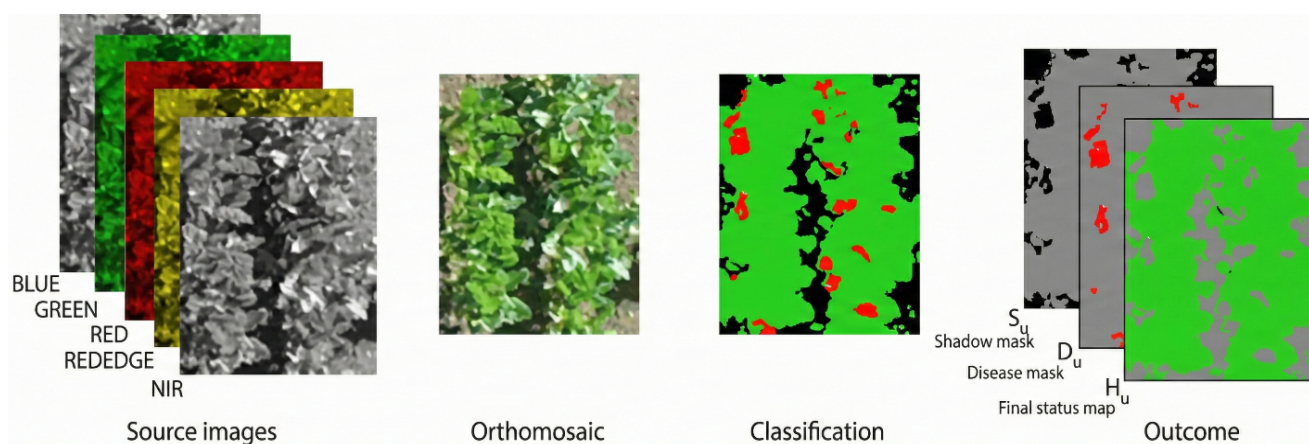


Fig. 4. Stages of multispectral image processing for detecting sugar beet phytopathologies: from acquiring spectral channels to constructing the final plant status map

Results and Discussion

The developed methodology for quantitative assessment of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) infestation by *Cercospora* leaf spot (*Cercospora beticola* Sacc.) based on multispectral aerial photography and the U-Net semantic segmentation algorithm was validated under production conditions. The dataset comprised plots with varying degrees of phytopathological impact, which underwent laboratory verification to provide a validation basis for assessing the accuracy of automatic detection.

As a result of processing multispectral orthomosaics and calculating vegetation indices (NDVI, NDRE, MCARI, NSVDI, etc.), we generated a dataset of 420 annotated fragments, classified into three main categories: infected areas, healthy leaf surface, and background (soil/other). Semantic segmentation was used to identify infected pixels with an F1-score accuracy of up to 46% using an ensemble model, which surpassed the accuracy of baseline classifiers (PLS-DA, RF, KNN, SVM) by 18.6 percentage points. This data supports the hypothesis that hybrid architectures and deep segmentation offer advantages over conventional classification methods.

The highest accuracy for multiclass categorization on the test set (88.6%) was achieved using an integrated algorithmic pipeline combining the strengths of multiple models (i.e. a combined approach). However, at the individual class level, the best metric values varied depending on class structure and the nature of their spectral manifestation (Table 2).

The PLS-DA model demonstrated high generalization capability for the main classes: “Healthy plants” (F1 = 86.2) and “Soil” (F1 = 68.4), confirming its robustness to noise and a balanced trade-off between precision and recall in the presence of significant inter-class variance. The F1 score for the “Healthy plants” class exceeded that of SVM-lin, RF, and KNN by 0.5-4.7%, likely due to the high spectral homogeneity of this class

and its dominance in the training set. However, even with high precision for healthy pixels (Prec = 84.5), there was a decrease in sensitivity regarding the “Infected plants” class (F1 = 27.4), indicating insufficient representativeness of training features in areas with anomalous spectral states.

The support vector machine with a radial basis function kernel (SVM-RBF) method demonstrated the highest sensitivity to infected areas, achieving an F1 score of 42.5 with a precision of 30.1% and recall of 74.2%. This suggests SVM-RBF’s capability to effectively capture heterogeneous patterns associated with phytopathological changes, despite a significant bias in precision. Compared to PLS-DA, the F1 metric for the “Inected plants” class increased by 15.1%, highlighting the feasibility of using SVM-RBF for disease monitoring tasks with limited prior (a priori) information.

The Random Forest (RF) algorithm provided balanced performance across most classes, with F1-scores of 39.4 for infected plants, 84.0 for healthy plants, and 65.3 for soil. However, when compared to the integrative pipeline model, it was inferior in all key metrics, particularly in the segmentation of categories with unstable spectral profiles (“Other” and “Infected plants”).

Linear SVM (SVML) and KNN methods proved to be the least effective, with F1-scores for the “Infected” class at 27.5 and 30.6, respectively, characterized by low precision and moderate recall. This demonstrates the poor ability of linear or local methods to generalize under conditions of high intra-class variability.

To enhance the reliability of the results, five-fold stratified cross-validation was employed. Confidence intervals for precision and F1 metrics were calculated using the bootstrap method with 1,000 iterations. A comparison of models based on F1 metrics was conducted using a t-test ($p < 0.05$). This approach objectively confirmed the statistical significance of the differences between conventional classification methods (PLS-DA, RF,

Comparative effectiveness of machine learning models for multiclass categorization of sugar beet crop phytosanitary status based on UAV multispectral imaging data

Table 2

Method	Accuracy	Class								
		“Infected”			“Healthy”			“Soil”		
		precision	recall	F1	precision	recall	F1	precision	recall	F1
PLS-DA	87.2	26.8	28.1	27.4	84.5	88.1	86.2	63.1	75.0	68.4
SVML	84.9	25.4	68.4	36.9	85.2	90.2	87.6	62.4	78.6	69.7
SVMR	85.1	30.1	74.2	42.5	84.1	87.3	85.7	61.2	77.3	68.3
RF	82.3	27.5	70.6	39.4	83.4	84.7	84.0	60.9	70.4	65.3
KNN	78.4	20.2	64.0	30.6	81.1	82.0	81.5	55.3	68.0	61.0
Pipeline	88.6	34.7	69.3	46.0	91.6	93.5	92.5	66.5	71.2	68.7

KNN, SVM) and the proposed U-Net neural network architecture.

The integrative pipeline, which aggregates the output signals of the baseline classifiers, demonstrated the best balance between sensitivity and specificity, particularly for the “Healthy plants” ($F1 = 92.5$) and “Other” ($F1 = 78.7$) classes. It also provided the highest F1-score for infected plants (46.0), which is 18.6 percentage points (p.p.) higher than that of the PLS-DA model. These results confirm the feasibility of using ensemble strategies for the classification of complex agrobiocenoses based on multispectral information.

It should be emphasized that the maximum sensitivity to infected areas is provided specifically by the U-Net neural network segmentation. For the “Infected plants” class, U-Net demonstrated an F1-score of 46.0%, the highest among all studied models. At the same time, the integrative algorithmic pipeline stabilizes the overall multiclass classification and increases the final balanced accuracy (Accuracy = 88.6%). Thus, U-Net serves as the key element for the quantitative

detection of phytopathological impact, while the pipeline acts as a tool for generating a robust final crop status map.

To assess the contribution of different types of input features to the final classification, the Area Under the Precision-Recall Curve (AUC-PR) was calculated. Figure 5 presents the Precision-Recall (PR) curves for the three object classes. The analysis of PR curves allows for a quantitative assessment of classification effectiveness under various feature combinations, including spectral bands (SB), vegetation indices (VI), digital surface models (DSM), shadows (SH), and red-edge reflectance (RE).

Area Under the Curve (AUC) values reflect the generalized classification accuracy. The highest AUC values were obtained using the feature combination SB-VI-SH-DSM_r-RE: 0.96 for the “Healthy” class; 0.45 for the “Infected” class; and 0.80 for the “Soil” and “Other” classes. This indicates the advantage of integrating multispectral and spatial information for solving pixel-wise segmentation tasks.

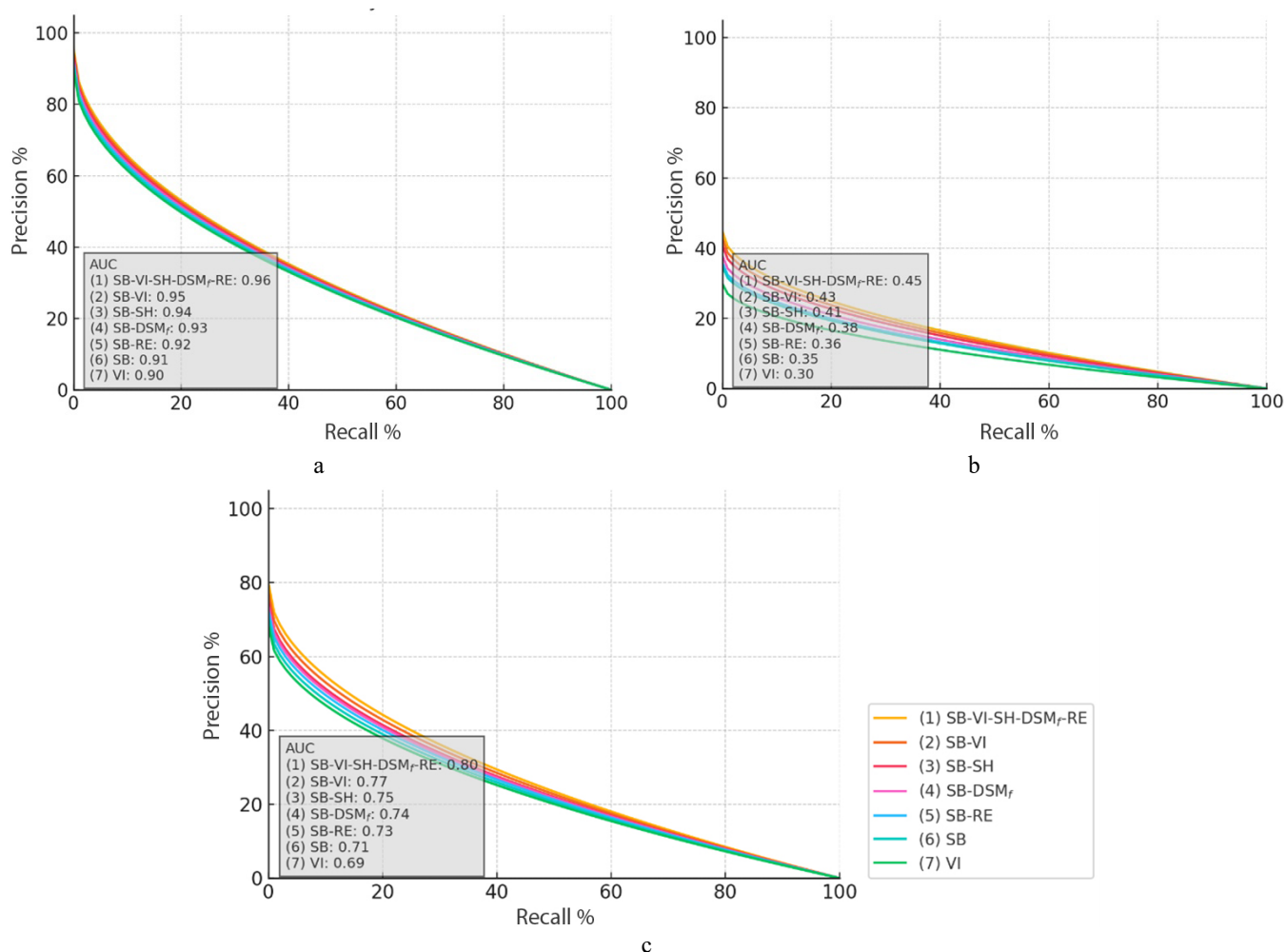


Fig. 5. Precision-Recall dependency in the classification of sugar beet leaf status using a combination of spectral and spatial features:

a – “Healthy plants” class; b – “Infected plants” class; c – combined “Soil and Other” class

For the “Healthy” class, high classification accuracy was observed across all feature sets, which is attributed to the distinct spectral signature of non-infected plants. The low AUC values for the “Infected” class indicate the difficulty of accurately identifying diseased areas at early stages. The combined “Soil and Other” class demonstrates intermediate classification performance, primarily due to differences in spectral contrast and background texture.

The results obtained are comparable to data presented in several international studies. For instance, in study [1], which focused on detecting *Cercospora* leaf spot using satellite imagery and CNNs, the average detection accuracy did not exceed 78%, confirming the advantage of using multispectral camera-equipped UAVs for detailed diagnostics. Furthermore, the use of surface vector normals and the consideration of illumination geometry in the present work improved the model’s robustness to varying acquisition angles – a factor not addressed in most similar studies.

The choice of data (high-precision orthomosaics, spectral and geometric features, and pixel-wise annotation) was driven by the need for reliable modeling of spatial infection distribution and objective assessment of segmentation accuracy. The combination of manual verification, quantitative indices, and deep learning models ensures a high degree of result reproducibility and system adaptability to other phytopathologies.

Our findings align with current trends in agrotechnological research: unmanned systems combined with computer vision algorithms are gradually replacing manual labor in plant disease diagnostics, providing more accurate and reproducible information. For example, Barreto et al. [9] demonstrated that UAV multispectral imaging and machine learning can calculate *Cercospora* Disease Severity (DS) indices and their temporal dynamics. Moreover, automated analysis distinguishes differences between varieties more clearly than traditional visual monitoring. Our approach also opens up prospects for replacing labor-intensive field assessments with precise, unbiased image analysis to automatically derive agronomic metrics such as the percentage of infected leaves and the area of infection foci.

It should be noted that the quality of input data is a key factor in the success of such systems. Multispectral cameras provide useful information in additional bands, improving plant stress recognition accuracy. However, their spatial resolution may be lower than that of standard RGB cameras. S. Jay et al. [15] noted that ultra-high-resolution RGB images ensured better assessment of mild infection levels, whereas coarser-resolution drone multispectral images were only effective in identifying advanced disease stages. In our case, a flight altitude

of 30 m and the camera specifications provided sufficient detail to detect individual spots a few millimeters in diameter. Increasing the altitude or flight speed may reduce recognition accuracy; thus, lower altitudes and high-quality camera optics (or the use of ground-based imaging for small-scale analysis) are preferable for the early detection of individual lesions.

The research results confirm the working hypothesis regarding the feasibility of applying U-Net models to multispectral imagery and demonstrate the capacity of this methodology for implementation in precision farming practices. These findings are supported by statistically significant metrics and are comparable to or exceed the results of similar scientific publications, testifying to the scientific novelty and high practical significance of the developed approach.

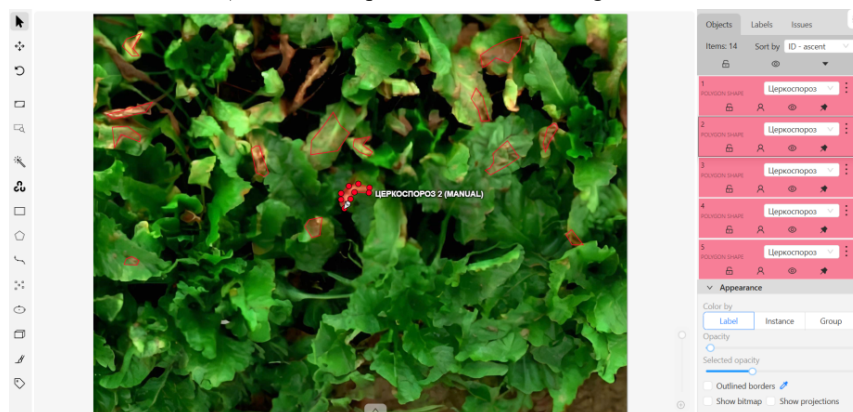
Accuracy analysis of various machine learning models demonstrated the advantages of a combined pipeline that integrates the strengths of PLS-DA, SVM, and Random Forest. The most robust accuracy indicators were achieved using ensemble methods, particularly for the “Healthy plants” class ($F1 = 92.5$), while the highest sensitivity to infection symptoms was identified in SVM with a radial basis function kernel ($F1 = 42.5$). However, even with integrated processing, the limited $F1$ -score values for infected leaves (not exceeding 46%) indicate the need for further refinement of the training dataset and the inclusion of additional features reflecting physiological changes during the early stages of infection.

A comparison of spectral indices and their combinations confirmed that the integration of multispectral and spatial features (SB-VI-SH-DSM-RE) achieves the highest overall classification accuracy ($AUC = 0.96$ for healthy plants). This confirms the importance of a comprehensive approach when constructing segmentation models for agromonitoring. At the same time, the lower AUC values for the “Infected” class (0.45) highlight the difficulty of automatically detecting subtle disease symptoms at initial stages, especially under conditions of spectral heterogeneity within the crops. For the early stages of the disease, traditional classifiers demonstrate a high rate of missed infected pixels (false negatives), whereas U-Net provides more stable detection of primary foci (Fig. 6).

It can be concluded that the developed methodology has high practical significance for precision farming and integrated plant protection. Its application not only automates the monitoring of phytopathologies but also enhances the timeliness of decision-making regarding the feasibility of fungicide applications. This, in turn, contributes to reducing costs for plant protection products and minimizing the environmental impact on the agroecosystem.



a) initial multispectral orthomosaic fragment



b) expert annotation



c) U-Net segmentation result

Fig. 6. Detection of primari infection foci

Conclusions

1. The research results confirmed the effectiveness of the proposed methodology for the quantitative assessment of Cercospora leaf spot infection in sugar beet using UAV-based multispectral imaging and the U-Net segmentation algorithm. The integration of five spectral channels (Blue, Green, Red, Red-edge, NIR), vegetation indices (NDVI, NSVDI, MCARI, etc.), and spatial features (surface normals, shadows) achieved an overall multiclass categorization accuracy of 88.6%.

2. The U-Net model demonstrated a clear advantage over traditional machine learning algorithms: the F1-score for the “Infected plants” class was 46.0%, which is 18.6 percentage points higher than the best standalone classifier (PLS-DA, $F1 = 27.4\%$). F1-scores of 92.5% for “Healthy plants” and 68.7% for “Soil and background” were achieved, confirming the balance and reliability of the proposed approach.

3. The highest area under the precision-recall curve ($AUC = 0.96$) was obtained for the “Healthy

plants” class, indicating the high reproducibility and robustness of the methodology against variability in spectral features.

4. The proposed approach provides accurate, scalable, and reproducible detection of plant infection centers in field conditions, enabling rapid

decision-making for plant protection applications and reducing the costs of agrochemical treatments. Future research will focus on expanding the volume of training data, utilizing hyperspectral channels, and adapting the developed model for other crops and diseases.

References

1. Görlich F., Marks E., Mahlein A.-K. et al. UAV-based classification of cercospora leaf spot using RGB images. *Drones*. 2021;5(2):34. <https://doi.org/10.3390/drones5020034>
2. Tuğrul K.M., Kaya R., Özkan K. et al. Early detection of Cercospora beticola and powdery mildew diseases in sugar beet using uncrewed aerial vehicle-based remote sensing and machine learning. *PeerJ*. 2025;13: e19530. <https://doi.org/10.7717/peerj.19530>
3. Kochkarov A.A., Kulikov A.K., Olkhova V.A., Rybak A.N., Stacmich A.S. An intelligent plant monitoring and early warning system based. *Izvestiya SFe-dU. Engineering Sciences*. 2025;2:61-68. (In Russ.) <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2025-2-61-68>
4. Glukhikh I.N., Prokoshin A.S., Glukhikh D.I., Filatova T.A. Computer vision neural networks in support systems for making decision on a smart farm. *Vestnik of the Russian Agricultural Science*. 2024;1:53-57. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S2500208224010121>
5. Dvornichenko A.S., Sosnovskiy I.A., Gapon N.V., Zhdanova M.M. Method for recognizing grapevine diseases from images using neural networks. Current Problems of Science and Technology 2024: Proceedings of the All-Russian (National) scientific and practical conference, Rostov-on-Don, March 19-21, 2024. Rostov-on-Don: Don State Technical University. 2024:426-427. (In Russ.)
6. Mudarisov S.G., Miftakhov I.R. Deep learning methods and UAV technologies for crop disease detection. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024;18(4):24-33. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2024-18-4-24-33>
7. Shapovalov D.A., Vedeshin L.A., Evstratova L.G., Antoshkin A.A. Methods of using multispectral images in ecological monitoring of reclaimed lands. *Sovremennyye problemy dstantsionno-go zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*. 2023;20;4:187-201. (In Russ.) <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-4-187-201>
8. Torkunova Ju.V., Ivanov D.Ye. A mobile application for the automated diagnosis of diseases of agricultural crops and the selection of recommendations for their treatment. *International Journal of Advanced Studies*. 2024;14;1:168-183. (In Russ.) <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2024-14-1-276>
9. Barreto A., Yamati F.R.I., Varrelmann M. et al. Disease incidence and severity of cercospora leaf spot in sugar beet assessed by multispectral unmanned aerial images and machine learning. *Plant Disease*. 2023;107(1):188-200. <https://doi.org/10.1094/PDIS-12-21-2734-RE>
10. Leite D.V., de Brito A.V., Faccioli G.G., Vieira G.H.S. Deep learning models for detection and severity assessment of Cercospora leaf spot (Cercospora capsici) in chili peppers under natural conditions. *Plants*. 2025;14(13):2011. <https://doi.org/10.3390/plants14132011>
11. Neupane K., Baysal-Gure F. Automatic identification and monitoring of plant diseases using unmanned aerial vehicles: A review. *Remote Sensing*. 2021;13(19):3841. <https://doi.org/10.3390/rs13193841>

Список источников

1. Görlich F., Marks E., Mahlein A.-K. et al. UAV-based classification of cercospora leaf spot using RGB images. *Drones*. 2021;5(2):34. <https://doi.org/10.3390/drones5020034>
2. Tuğrul K.M., Kaya R., Özkan K. et al. Early detection of Cercospora beticola and powdery mildew diseases in sugar beet using uncrewed aerial vehicle-based remote sensing and machine learning. *PeerJ*. 2025;13: e19530. <https://doi.org/10.7717/peerj.19530>
3. Кочкаров А.А., Куликов А.К., Ольхова В.А. и др. Интеллектуальная система раннего оповещения и мониторинга растений // Известия ЮФУ. Технические науки. 2025. № 2. С. 61-68. <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2025-2-61-68>
4. Глухих И.Н., Прохoshин А.С., Глухих Д.И., Филатова Т.А. Нейросети компьютерного зрения в системах поддержки принятия решений на умной ферме // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2024. № 1 С. 53-57. <https://doi.org/10.31857/S2500208224010121>
5. Дворниченко А.С., Сосновский И.А., Гапон Н.В., Жданова М.М. Метод распознавания заболеваний виноградных кустов по изображениям с использованием нейронных сетей // Актуальные проблемы науки и техники-2024: Материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 19-21 марта 2024 г. Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет, 2024. С. 426-427. EDN: SSIWQS
6. Мударисов С.Г., Мифтахов И.Р. Методы глубокого обучения и технологии БПЛА для идентификации заболеваний сельскохозяйственных растений // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2024. Т. 18, № 4. С. 24-33. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2024-18-4-24-33>
7. Шаповалов Д.А., Ведешин Л.А., Евстратова Л.Г., Антошкин А.А. Методы использования мультиспектральных снимков при экологическом мониторинге мелиорированных земель // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20, № 4. С. 187-201. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-4-187-201>
8. Торкунова Ю.В., Иванов Д.Э. Мобильное приложение по автоматизированной диагностике болезней агрокультур и подбору рекомендаций их лечения // International Journal of Advanced Studies. 2024. Т. 14, № 1. С. 168-183. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2024-14-1-276>
9. Barreto A., Yamati F.R.I., Varrelmann M. et al. Disease incidence and severity of cercospora leaf spot in sugar beet assessed by multispectral unmanned aerial images and machine learning. *Plant Disease*. 2023;107(1):188-200. <https://doi.org/10.1094/PDIS-12-21-2734-RE>
10. Leite D.V., de Brito A.V., Faccioli G.G., Vieira G.H.S. Deep learning models for detection and severity assessment of Cercospora leaf spot (Cercospora capsici) in chili peppers under natural conditions. *Plants*. 2025;14(13):2011. <https://doi.org/10.3390/plants14132011>
11. Neupane K., Baysal-Gure F. Automatic identification and monitoring of plant diseases using unmanned aerial vehicles: A review. *Remote Sensing*. 2021;13(19):3841. <https://doi.org/10.3390/rs13193841>

12. Kamilaris A., Prenafeta-Boldú F.X. Deep learning in agriculture: A survey. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2018;147:70-90. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.02.016>
13. Mohanty S.P., Hughes D.P., Salathé M. Using deep learning for image-based plant disease detection. *Frontiers in Plant Science*. 2016;7:1419. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01419>
14. Barbedo J.G.A. Plant disease identification from individual lesions and spots using deep learning. *Biosystems Engineering*. 2019;180:96-107. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.02.002>
15. Jay S., Comar A., Bénicio R. et al. Scoring Cercospora leaf spot on sugar beet: Comparison of UGV and UAV phenotyping systems. *Plant Phenomics*. 2020;2020:9452123. <https://doi.org/10.34133/2020/9452123>
16. Bauriegel E., Giebel A., Geyer M. et al. Early detection of fusarium infection in wheat using hyper-spectral imaging. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2010;75(2):304-312. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2010.12.006>
17. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. *Lecture Notes in Computer Science*. 2015;9351:234-241. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_28

Author Information

Salavat G. Mudarisov¹, DSc (Eng), Professor;
salavam@gmail.com[✉]; <https://orcid.org/0000-0001-9344-2606>;
Scopus Author ID: 57200284613

Ilnur R. Miftakhov², CSc (Eng); info323@bk.ru;
<https://orcid.org/0000-0002-3125-3532>

Ildar M. Farkhutdinov³, DSc (Eng), Associate Professor;
ildar1702@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6443-8584>

^{1,2,3} Bashkir State Agrarian University, Department of Mechatronic Systems and Machines for Agricultural Production; St. 50 years of October, 34, Ufa, 450001, Republic of Bashkortostan, Russian Federation

Author Contribution

S.G. Mudarisov – research supervision, methodology;
I.R. Miftakhov – investigation, data verification, visualization, writing – review and editing of the manuscript;
I.M. Farkhutdinov – research background analysis, investigation.

Conflict of interests

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

Received 26.09.2025; Revised 29.11.2025; Accepted 01.12.2025

12. Kamilaris A., Prenafeta-Boldú F.X. Deep learning in agriculture: A survey. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2018;147:70-90. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.02.016>
13. Mohanty S.P., Hughes D.P., Salathé M. Using deep learning for image-based plant disease detection. *Frontiers in Plant Science*. 2016;7:1419. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01419>
14. Barbedo J.G.A. Plant disease identification from individual lesions and spots using deep learning. *Biosystems Engineering*. 2019;180:96-107. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.02.002>
15. Jay S., Comar A., Bénicio R. et al. Scoring Cercospora leaf spot on sugar beet: Comparison of UGV and UAV phenotyping systems. *Plant Phenomics*. 2020;2020:9452123. <https://doi.org/10.34133/2020/9452123>
16. Bauriegel E., Giebel A., Geyer M. et al. Early detection of fusarium infection in wheat using hyper-spectral imaging. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2010;75(2):304-312. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2010.12.006>
17. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. *Lecture Notes in Computer Science*. 2015;9351:234-241. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_28

Информация об авторах

¹ **Мударисов Салават Гумерович**, д-р техн. наук, профессор;
salavam@gmail.com[✉]; <https://orcid.org/0000-0001-9344-2606>;
SPIN-код: 6893-9957

² **Мифтахов Ильнур Ринатович**, канд. техн. наук;
info323@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3125-3532>;
SPIN-код: 9429-5990

³ **Фархутдинов Ильдар Мавляирович**, д-р техн. наук, доцент;
ildar1702@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6443-8584>;
SPIN-код: 8646-6670

^{1,2,3} **Башкирский государственный аграрный университет**, кафедра мехатронных систем и машин аграрного производства; 450001, Российская Федерация, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. 50 лет Октября, 34

Вклад авторов

С.Г. Мударисов – руководство исследованиями, методология;
И.Р. Мифтахов – проведение исследований, верификация данных, визуализация, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;
И.М. Фархутдинов – анализ предметной области, проведение исследований.

Конфликт интересов

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

Статья поступила 26.09.2025, после рецензирования и доработки 29.11.2025; принята к публикации 01.12.2025

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.1:004.83

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-1-16-25>

Искусственный интеллект в управлении животноводческой фермой

А.С. Дорохов¹, В.В. Кирсанов², Р.А. Баишева³, С.В. Кирсанов⁴^{1,2,3,4} Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия¹ dorokhov.vim@yandex.ru; <http://orcid.org/0000-0002-4758-3843>² kirvv2014@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0003-2549-4070>³ rozamamedova@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0001-9145-4478>⁴ kirseryii@mail.ru

Аннотация. Внедрение интеллектуальных цифровых систем управления предполагает достижение высоких показателей производственной деятельности сельхозпредприятий. Схему управления животноводческой фермой целесообразно рассматривать с позиции теории биомашсистем, с детальным анализом функциональных связей между элементами сложной системы. Исследования проведены с целью обоснования структуры и функционала искусственного интеллекта для управления биомашсистемой животноводческой фермы, представленной в виде неориентированного мультиграфа с вершинами элементов «Человек – Машина – Животное – Продукция – Окружающая среда» и функциональных связей между ними. В качестве объекта исследований рассмотрены технологические локальные биомашсистемы доения и первичной обработки молока, приготовления и раздачи кормов, обеспечения микроклимата, навозоудаления, проанализированы их функциональные связи в виде ориентированного мультиграфа. Систематизированы функции искусственного интеллекта в указанных локальных биомашсистемах животноводческой фермы. В качестве примера представлена структурно-функциональная схема взаимодействия локальных биомашсистем доения и кормления в режиме интернета вещей. Передача (обмен) сигналов между локальными биомашсистемами без связи с «центром управления» (АРМ-специалистов) обуславливает их автономное функционирование и согласованное эффективное управление. Систематизация функций искусственного интеллекта поможет в дальнейшем разработать соответствующие телекоммуникационные интеллектуальные цифровые системы контроля качества работы операторов, машин и оборудования, физиологического состояния животных, управления экономикой и экологией предприятия в целом.

Ключевые слова: искусственный интеллект; биомашсистема; искусственный интеллект в управлении животноводческой фермой; интеллектуальные цифровые системы; неориентированный мультиграф; функции искусственного интеллекта

Для цитирования: Дорохов А.С., Кирсанов В.В., Баишева Р.А., Кирсанов С.В. Искусственный интеллект в управлении животноводческой фермой // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 1. С. 16-25. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-1-16-25>

ORIGINAL ARTICLE

Use of artificial intelligence for managing a livestock farm

A.S. Dorokhov¹, V.V. Kirsanov², R.A. Baisheva³, S.V. Kirsanov⁴^{1,2,3,4} Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Moscow, Russia¹ dorokhov.vim@yandex.ru; <http://orcid.org/0000-0002-4758-3843>² kirvv2014@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0003-2549-4070>³ rozamamedova@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0001-9145-4478>⁴ kirseryii@mail.ru

Abstract. The implementation of intelligent digital control systems is essential for achieving high performance in agricultural enterprises. The study applies the biomachine systems theory to livestock farm management to analyze the functional links between complex system components. The research justifies the structure and functionality of an artificial intelligence (AI) framework for managing livestock biomachine systems. In this model, the farm is represented as an undirected multigraph, where vertices represent the “Human-

Machine-Animal-Product-Environment” (H-M-A-P-E) elements and edges represent their functional interconnections. The study examines localized biotechnological systems – specifically milking and primary processing, feed preparation and distribution, microclimate control, and manure removal – analyzing their functional relationships through a directed multigraph. The authors categorize AI functions within these localized systems and provide a structural-functional diagram illustrating the interaction between milking and feeding systems within the Internet of Things (IoT) framework. The direct exchange of signals between these local systems, independent of a centralized “control center” (workstation), enables autonomous functioning and effective coordinated management. The systematization of AI functions presented here facilitates the development of intelligent telecommunication systems for monitoring operators’ performance, machine efficiency, physiological condition of animals, and the overall economic and environmental sustainability of the enterprise.

Keywords: artificial intelligence; biomachine system; artificial intelligence in livestock farm management; intelligent digital systems; undirected multigraph; artificial intelligence functions

For citation: Dorokhov A.S., Kirsanov V.V., Baisheva R.A., Kirsanov S.V. Use of artificial intelligence for managing a livestock farm. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(1):16-25 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-1-16-25>

Введение

Сельскохозяйственные предприятия активно внедряют передовые агротехнологии и интеллектуальные цифровые геоинформационные системы управления производством для достижения высоких показателей производственной деятельности [1, 2, 3]. По результатам работы профильными специалистами: агрономами, зоотехниками, ветврачами, экономистами и др. (тип ЧЭ – человек-эксперт) – принимаются соответствующие управленческие решения [4, 5]. В процессе взаимодействия элементов системы формируется ряд общих задач, решаемых на основе теории функциональных систем, в том числе с помощью искусственного интеллекта (ИИ) с целью обработки большого массива данных и выделения ключевых моментов, влияющих на процесс принятия решений, управления быстро протекающими процессами в условиях высокой вариабельности распознавания образов и неопределенности поведения биологических объектов, управления логистическими потоками и др. [6, 7]. Схему управления сложной биомашсистемой животноводческой фермы можно представить в виде неориентированного мультиграфа с вершинами элементов «Человек – Машина – Животное – Продукция – Окружающая среда» (Ч-М-Ж-П-ОС) и ребрами (функциональными связями между элементами системы), которые являются результатом деятельности локальных биомашсистем доения, кормления, обеспечения микроклимата и др. в процессе технологического обслуживания животных с участием человека-оператора (ЧО) в автоматизированных или роботизированных системах обслуживания [8, 9]. Управление сложной биомашсистемой животновод-

ческого объекта сводится к последовательности действий:

- составляется неориентированный мультиграф биомашсистемы животноводческой фермы «Ч-М-Ж-П-ОС», отражающий функциональные связи и взаимодействие отдельных подсистем;

- составляются ориентированные мультиграфы локальных биомашсистем и определяется функционал, выполняемый каждой подсистемой «Ч», «М», «Ж», «П», «ОС» по ребрам графа (входящие и исходящие действия, управленческие решения и др.);

- формируются задачи контроля и управления, решаемые с помощью искусственного интеллекта: контроль качества работы машин и оборудования, идентификация животных и продукции, прогнозистические модели развития животных и их продукционных процессов (кривые лактации), управление экономикой предприятия, решаются логистические задачи управления входящими и исходящими материальными потоками, оценивается функциональная надежность техники и др. Общий контроль остается за человеком-оператором (ЧО) на рабочем месте и человеком-экспертом (ЧЭ) – зоотехником и ветврачом – на автоматизированных рабочих местах (АРМ-специалистов).

Цель исследований: обосновать структуру и функционал искусственного интеллекта для управления биомашсистемой животноводческой фермы.

Научная новизна работы представлена графо-аналитической оценкой функциональных связей в локальных биомашсистемах животноводческой фермы, обоснованием структуры и функционала искусственного интеллекта (ИИ), позволяющих разработать соответствующие телекоммуникационные цифровые

системы контроля качества работы операторов, машин и оборудования, физиологического состояния животных, управления экономикой и экологией предприятия в целом.

Материалы и методы

Применили метод когнитивного моделирования сложных систем, предполагающий выбор управляющего решения из комплекса формализованных моделей, представляющих причинно-следственные связи между факторами (концепциями), являющимися вершинами ориентированного графа [10] с пошаговым дискретным алгоритмом их анализа. Формализация связей осуществляется с использованием известных приложений теории графов на основе алгоритмов Дейкстры и Беллмана-Форда для поиска кратчайших путей в графе с неотрицательными и отрицательными весами, алгоритма Форда-Фалкерсона для определения максимального потока и моделирования пропускной способности технологических линий при использовании и распределении ресурсов, алгоритма поиска оптимального покрытия или разбиения для определения минимального набора операторов или машин, необходимых для выполнения всех задач, анализа центральности вершин для выявления наиболее важных или влиятельных компонентов системы и др. [11, 12].

В рассматриваемой биомашсистеме животноводческой фермы «Ч-М-Ж-П-ОС» вершинами графа являются субъекты и объекты производственных процессов, а возникающие между ними функциональные связи (ребра графа) требуют оптимизации с целью повышения эффективности управления технологическими процессами, продуктивности животных и качества производимой продукции, использования ресурсов, снижения когнитивной нагрузки на операторов и экологической нагрузки на окружающую среду. Неориентированный мультиграф биомашсистемы животноводческой фермы в соответствии с рекомендациями [13] представлен на рисунке 1.

Для анализа и решения задач управления сложным биотехнологическим объектом выделим три подсистемы:

1. Технологические локальные биомашсистемы (ЛБМС_м), участвующие в выполнении механизированных и автоматизированных процессов машинного обслуживания животных: поения, кормления, обеспечении микроклимата, доения, навозоудаления и др. Данные биомашсистемы управляют входящими материальными потоками: водой, воздухом, кормами, подстилкой, ветпрепаратами и др.,

предназначенными для животных или получаемыми от них исходящими материальными производственными потоками – приплодом, молоком, экскрементами и др. ЛБМС_м управляются локальными информационно-управляющими системами ЛИУС_м, взаимодействующими с автоматизированными рабочими местами специалистов фермы¹ [14].

2. Локальные биомашсистемы контроля физиологического состояния животных (ЛБМС_ж), обеспечивающие процессы зооветеринарного обслуживания животных (контроль рационов кормления, диагностика и лечение заболеваний, искусственное осеменение, воспроизводство, прогноз моделей развития животных и их продуктивности и др.). ЛБМС_ж управляются локальными информационно-управляющими системами ЛИУС_ж [15, 16].

3. Информационно-управляющая система фермы ИУС_ф, осуществляющая управление экономикой, сбытовой логистикой продукции, материально-техническим обеспечением и др.

Задачи для трех групп подсистем должны формироваться естественным интеллектом человека, искусственным интеллектом или их возможными комбинациями [17, 18].

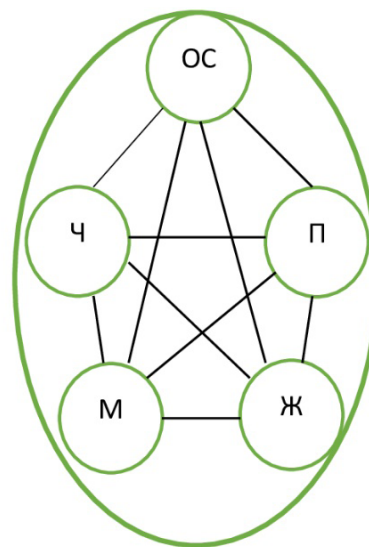


Рис. 1. Неориентированный мультиграф сложной биомашсистемы животноводческой фермы:

Ч – человек; М – машина; Ж – животное;
П – продукция; ОС – окружающая среда

Fig. 1. Undirected multigraph of a complex biomachine system of a livestock farm:

Ч – human; М – machine; Ж – animal;
П – products; ОС – environment

¹ Измайлов А.Ю., Цой Ю.А., Кирсанов В.В. Технологические основы алгоритмизации и цифрового управления процессами молочных ферм: Монография. М.: Научно-издательский центр «Инфра-М», 2019. 208 с. EDN: UWAZMI.

Результаты и их обсуждение

Рассмотрим технологические локальные биомашсистемы доения и первичной обработки молока (ЛБМС_д), приготовления и раздачи кормов (ЛБМС_к), обеспечения микроклимата (ЛБМС_{мк}), навозоудаления (ЛБМС_н) и их функциональные связи в виде ориентированного мультиграфа [19] (рис. 2). Основные функциональные связи и технологические операции в локальных технологических биомашсистемах представлены в таблице 1.

Аналогичным образом можно представить функциональные связи в локальной биомашсистеме контроля физиологического состояния животных (ЛБМС_ж) и информационно-управляющей системе фермы ИУС_ф.

С учетом связей, приведенных в таблице 1, можно структурировать функционал применения искусственного интеллекта (табл. 2).

Использование ИИ и интернета вещей позволит осуществить автономное/частично автономное функционирование отдельных ЛБМС с непосредственной передачей (обменом) сигналов от одной ЛБМС к другой без связи с «центром управления» (АРМ-специалистов) (рис. 3) [8]. Предположим, что подсистема доения ЛБМС_д передает сигнал U_{oi}

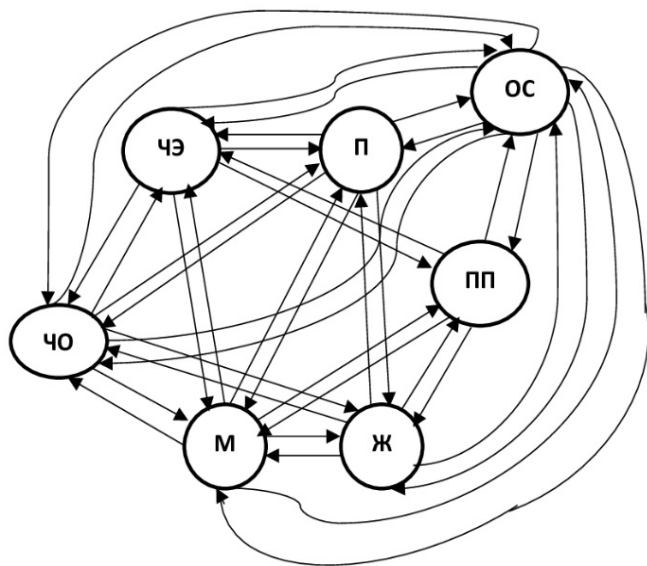


Рис. 2. Ориентированный мультиграф локальной технологической биомашсистемы (ЛБМС_м) животноводческой фермы:

ЧО – человек-оператор; ЧЭ – человек-эксперт;
М – машина; Ж – животное; П – продукция;
ПП – побочная продукция; ОС – окружающая среда

Fig. 2. Directed multigraph of the local technological biomachine system of a livestock farm:

ЧО – human operator; ЧЭ – human expert;
М – machine; Ж – animal; П – products;
ПП – by-products; ОС – environment

через свою базовую станцию BC_o подсистеме кормления ЛБМС_к (рис. 3) о снизившихся надоях у отдельной группы лактирующих животных без изменения показателей их здоровья и физиологического статуса. Подсистема кормления ЛБМС_к, принимая данный сигнал U_{ki} от своей базовой станции BC_k , формирует соответствующее решение о корректировке рациона кормления животных конкретной половозрастной группы. В этом случае может работать только первый контур локального управления I, осуществляющий автоматическую коррекцию рациона. При этом знание специалистов не требуется, и им направляются SMS-сообщения (I_{ki} , I_{oi}). В свою очередь, специалисты фермы (ЧЭ), работающие на АРМ, получив соответствующие дублирующие сигналы через контур управления II, могут при необходимости перепроверить полученную информацию и отправить ответные информационные сигналы-распоряжения (I_{ai}^k , I_{ai}^d) в буфер обмена информации – базы данных (БД), предназначенные для изменения параметров и режимов работы ЛБМС_к и ЛБМС_д.

Аналогичным образом могут работать ЛБМС_{мк} и ЛБМС_н. Например, при изменении параметров микроклимата (повышении загазованности помещения NH_3 , CO_2 и H_2S) в момент включения системы навозоудаления включается принудительная система вентиляции, удаляющая избыток вредных газов. То же самое происходит при повышении температуры и относительной влажности воздуха в помещении. Сигналы с датчиков животных и помещений поступают в соответствующие ЛБМС (кормления, микроклимата, навозоудаления), и они нормализуют ситуацию, увеличивая подачу воздуха, воды, корма и т.д.

В случае, если локальный уровень взаимодействия не может исправить ситуацию и требуется вмешательство специалистов, тогда информационные сигналы проходят в автоматизированные рабочие места АРМ, и профильные специалисты (ЧЭ), осматривая животных, выделенных подсистемой в отдельные группы, принимают решение; проверяется качество работы технологического оборудования. Для более эффективного управления технологическими процессами обслуживания животных в каждой локальной подсистеме формируется блок тестовых параметров, с которыми постоянно сравниваются отклонения текущих параметров биологических и машинных объектов.

Анализируя данные таблиц 1, 2, отметим, что в процессе развития интеллектуальных систем управления производством естественный интеллект ЧО-ЧЭ постепенно передается машинному

Таблица 1

**Функциональные связи в локальных биомашсистемах доения, кормления,
обеспечения микроклимата, удаления, обработки и хранения навоза**

Table 1

Functional connections in the local biomachine systems of milking, feeding, climate control; manure removing, processing and storing

Элементы биомашсистемы и направление функциональных связей между ними		Вид локальной биомашсистемы			
		ЛБМС _д (доение)	ЛБМС _к (кормление, поение)	ЛБМС _{мк} (микроклимат)	ЛБМС _н (удаление и переработка навоза)
1		2	3	4	5
ЧО-ЧЭ	→	СМС-сообщения о проблемах			
	←	СМС-сообщения о решении по проблеме			
ЧО-М	→	Управление доильным аппаратом, промывкой оборудования	Управление кормораздатчиком	Управление вентиляцией	Управление навозоуборочным оборудованием и транспортерами
	→	Прием показаний (сообщений) с датчиков, приборов			
ЧО-Ж	→	Подготовка вымени, контроль процесса доения	Подготовка компонентов корма, контроль процесса кормления	Контроль температуры, сквозняков, поведения животных	Контроль чистоты стойл, подстилки проходов помещений
	←	Тревожная реакция животного (нет молокоотдачи, сбивание доильного аппарата)	Сортировка корма животными на кормовом столе	Реакция животных на тепловой стресс, сквозняки	Реакция животных на загрязненные стойла, малая продолжительность отдыха в боксе
ЧО-П	→	Контроль качества молока, наличие мастита у коров	Контроль качества воды, кормов	Контроль качества приточного воздуха	—
	←	Взятие проб молока на анализ	Взятие проб корма (воды) на анализ	Взятие проб приточного воздуха на анализ	—
ЧО-ПП	→	—	Контроль качества и количества кормовых остатков	—	Контроль качества навоза (побочной продукции)
	←	—	Взятие проб остатков корма на анализ	—	Взятие проб навоза (побочной продукции) на анализ
ЧО-ОС	→	Контроль работы маслоуловителей вакуумных насосов	—	Контроль выбросов парниковых газов	Контроль выбросов парниковых газов и инфильтрации жидкости в системах удаления, обработки и хранения навоза
	←	Взятие на анализ проб выбрасываемого воздуха из вакуумных насосов	—	Взятие проб на для анализа выходящего воздуха из помещений	Взятие на анализ почвы, воды и воздуха вокруг животноводческой фермы
ЧЭ-М	→	Организация контрольных доек, периодического контроля вакуумного режима, санитарного состояния доильных установок	Организация периодического контроля качества кормов из хранилищ, корректировка рационов кормления	Организация периодической проверки качества работы систем вентиляции, локального обогрева молодняка	Организация периодической проверки работы оборудования для удаления, обработки и хранения навоза, санитарного состояния боксов
	←	Анализ информации с локальных постов доения, промывки оборудования, приборов оценки качества молока	Анализ информации с локальных постов кормления, бортовых контроллеров раздатчиков, приборов оценки качества кормов	Анализ информации с датчиков и локальных постов управления микроклиматом	Анализ информации с локальных постов управления системами удаления, обработки и хранения навоза
ЧЭ-П	→	Организация контроля качества молока при отгрузке на молокозавод	Организация периодического контроля качества однородности кормовых смесей	Организация периодического контроля качества приточного воздуха	—
	←	Анализ проб молока перед отгрузкой на молокозавод	Анализ проб корма (воды) после смешивания	Анализ проб приточного воздуха	—

Окончание табл. 1

1		2	3	4	5
ЧЭ-ПП	→	–	Организация периодического контроля качества и количества кормовых остатков	–	Организация периодического контроля качества навоза (побочной продукции)
	←	–	Анализ проб остатков корма на кормовом столе	–	Анализ проб навоза (побочной продукции)
ЧЭ-ОС	→	Организация периодического контроля работы маслоуловителей вакуумных насосов	–	Организация периодического контроля выбросов парниковых газов	Организация периодического контроля выбросов парниковых газов и инфильтрации жидкости в системах удаления, обработки и хранения навоза
	←	Анализ проб выбрасываемого воздуха из вакуумных насосов	–	Анализ проб выходящего воздуха из помещений	Анализ почвы, воды и воздуха вокруг животноводческой фермы
М-П	→	Управляемый выпуск воздуха для транспортирования молока, автоматический отбор проб при контрольных дойках, отделение аномального молока в потоке, вывод молока из-под вакуума	Автоматизированный отбор проб корма при анализе питательной ценности и качества смешивания кормов	Очистка приточного / вытяжного воздуха от пыли, вредных газов, охлаждение / подогрев, увлажнение / осушение	–
	←	Измерение электропроводности, оптических свойств и пенообразования молока	Измерение физико-механических и оптических свойств корма	Измерение физико-химических свойств приточного / вытяжного воздуха	–
М-Ж	→	Автоматический контроль и управление вакуумным режимом, частотой пульсаций, соотношением тактов, контроль скорости молокоотдачи, надоев молока, процесса промывки оборудования	Автоматизированный контроль погрузки, смешивания и раздачи кормов, пододвигание корма на кормовом столе	Автоматизированный контроль подачи приточного и вытяжного воздуха	–
	←	Припуск молока, продолжительность доения, планируемый удой молока	Поедаемость кормов животными, количество остатков корма на кормовом столе	Тепловой, холодовой стрессы, повышенная / пониженная двигательная активность, питье	–
М-ПП	→	–	Сбор и удаление остатков корма	–	Автоматизированное управление оборудованием для удаления, обработки и хранения навоза
	←	–	Оценка органолептических, физико-механических и оптических свойств остатков корма	–	Выделение экскрементов, загрязненность подстилки, степень заполнения навозных каналов
М-ОС	→	Сбор и утилизация (регенерация) моющих растворов, выхлопных газов масляных вакуумных насосов	Сбор и утилизация (регенерация) остатков корма	Очистка и утилизация (регенерация) загрязненного воздуха из помещений	Подготовка и внесение органических удобрений на поля
	←	Контроль шума работающих вакуумных насосов, стоков доильных залов	Контроль сбора и утилизация (регенерации) остатков корма	Контроль выброса парниковых газов	Анализ почвы, воды и воздуха вокруг животноводческой фермы

искусственному интеллекту, освобождая человека от рутины принимаемых повседневных управленческих операторских решений и предоставляя возможность сосредоточиваться на анализе и построении прогнозных моделей развития производства на ближайшую и отдаленную перспективы. При этом уровень, скорость и точность принимаемых решений

человеком-оператором (ЧО) и человеком-экспертом (ЧЭ) повышаются, поскольку качество параметров контролируется различными нейросетевыми программными продуктами, способными анализировать и обрабатывать большие массивы данных на разных уровнях и в различных производственных ситуациях.

Функции искусственного интеллекта в локальных биомашсистемах животноводческой фермы

Таблица 2

Table 2

Areas of using artificial intelligence in local biomachine systems of a livestock farm

Функциональная связь	Вид ЛБМСм				Вид и функционал контролирующего искусственного интеллекта (ИИ)
	ЛБМС _д	ЛБМС _к	ЛБМС _{мк}	ЛБМС _н	
ЧО-ЧЭ	+	+	+	+	ПО – обработка информации (текст, видео)
ЧО-ЧЭ-М	+	+	+	+	Интеллектуальные системы прогнозирования утомляемости операторов, надежности машин и оборудования
ЧО-ЧЭ-Ж	+	+	+	+	Интеллектуальные системы прогнозирования физиологического развития, поведения, возможных заболеваний и стрессоустойчивости животных
ЧО-ЧЭ-П	+	+	+	–	Интеллектуальные телеметрические системы экспресс-диагностики качества молока, кормов, воды, воздуха и др.
ЧО-ЧЭ-ПП	–	+	–	+	Интеллектуальные телеметрические системы контроля качества побочной продукции
ЧО-ЧЭ-ОС	+	–	+	+	Интеллектуальные телеметрические системы контроля метеоусловий, выброса парниковых газов, навозных стоков, травостоя пастбищ и др.
М-П	+	+	+	–	Интеллектуальные телеметрические системы контроля показателей работы машин и технологического оборудования с анализом проб качества продукции
М-Ж	+	+	+	–	Телеметрические системы контроля показателей качества обслуживания животных (вакуумный режим доильной установки, неравномерность раздачи корма и др.) и самих животных
М-ПП	–	+	–	+	Интеллектуальные телеметрические системы контроля показателей и режимов работы оборудования по переработке и хранению навоза
М-ОС	+	+	+	+	Интеллектуальные телеметрические системы контроля показателей работы фильтрационного, регенерирующего и очистного оборудования
П-ПП-ОС	+	–	+	+	Интеллектуальные телеметрические системы контроля отгрузки готовой продукции, очистки помещений от навоза, выхода стоков доильных залов, влияния окружающей среды на качество продукции

Примечание. +/– используется/не используется в ЛБМС данная система ИИ.

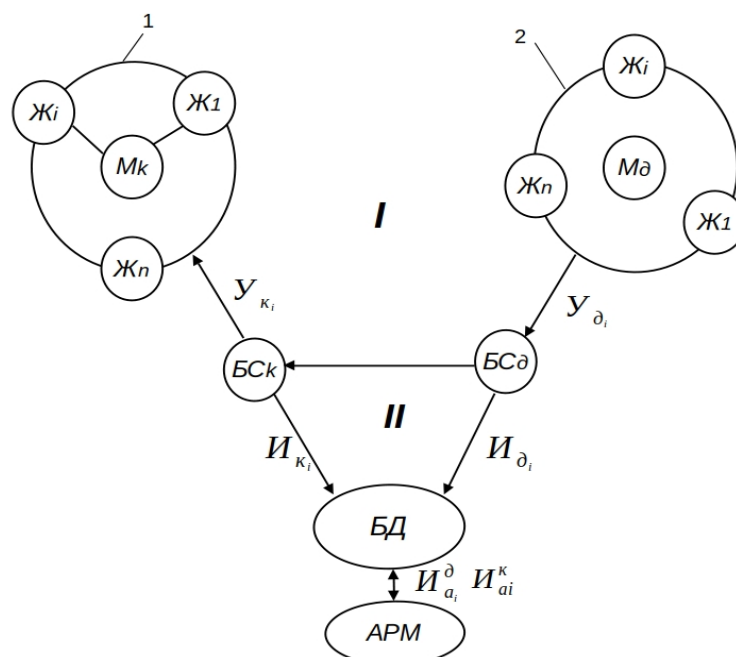


Рис. 3. Структурно-функциональная схема взаимодействия локальных биомашин систем доения ЛБМС_д и кормления ЛБМС_к в режиме интернета вещей:

I, II – контуры локального управления; 1, 2 – соответственно локальные автоматизированные и/или роботизированные биомашин системы кормления (ЛБМС_к) и доения (ЛБМС_д);
 Ж₁, Ж_к, Ж_н – обслуживаемые животные; М_к, М_д – модули кормления и доения;
 БС_к, БС_д – базовые станции, приемо-передающие сигналы от ЛБМС_к и ЛБМС_д соответственно;
 $Y_{кi}$, $Y_{дi}$ – исходящие и входящие сигналы от ЛБМС_к и ЛБМС_д соответственно;
 $I_{кi}$, $I_{дi}$ – информационные сигналы, передаваемые базовыми станциями БС_к и БС_д в буфер обмена информации (БД) для АРМ-специалистов (ЧЭ);
 $I_{ai}^к$, $I_{ai}^д$ – информационные сигналы (распоряжения), передаваемые АРМ-специалистами фермы (ЧЭ) в буфер обмена информации (БД) для корректировки режимов работы ЛБМС_к и ЛБМС_д;
 АРМ – автоматизированные рабочие места специалистов фермы (ЧЭ)

Fig. 3. Structural and functional diagram of the interaction between local biomachine systems for milking (ЛБМС_д) and feeding (ЛБМС_к) in the Internet of Things (IoT) framework:

I, II – local control loops; 1, 2 – local automated and/or robotic biomachine systems for feeding (ЛБМС_к) and milking (ЛБМС_д), respectively; Ж₁, Ж_к, Ж_н – animals being serviced; М_к, М_д – feeding and milking modules;
 БС_к, БС_д – base stations transmitting and receiving signals from ЛБМС_к and ЛБМС_д, respectively;
 $Y_{кi}$, $Y_{дi}$ – outgoing and incoming signals from ЛБМС_к and ЛБМС_д, respectively;
 $I_{кi}$, $I_{дi}$ – information signals transmitted by base stations БС_к and БС_д to the information exchange buffer (Data Base) for specialist workstations (Human Element);
 $I_{ai}^к$, $I_{ai}^д$ – information signals (instructions) transmitted by farm specialist workstations (Human Element) to the information exchange buffer (DB) to adjust the operating modes of ЛБМС_к and ЛБМС_д;
 АРМ – automated workstations for farm specialists (Human Element)

Выводы

1. Рассмотренные с помощью графоаналитического метода функциональные связи в локальных биомашин системах доения, кормления, обеспечения микроклимата, удаления и переработки навоза позволили выявить возможные направления применения искусственного интеллекта на животноводческих предприятиях в виде дистанционных телеметрических интеллектуальных цифровых систем контроля

качества работы операторов, машин и оборудования, физиологического состояния животных, управления экономикой и экологией предприятия.

2. Взаимодействие локальных автоматизированных и/или роботизированных биомашин систем позволяет в режиме реального времени с помощью ИИ и интернета вещей осуществить их автономное/частично автономное функционирование и согласованное эффективное управление.

Список источников

1. Лобачевский Я.П., Лачуга Ю.Ф., Измайлов А.Ю., Шогенов Ю.Х. Научно-технические достижения агроинженерных научных организаций в условиях цифровой трансформации сельского хозяйства // *Техника и оборудование для села*. 2023. № 4 (310). С. 2-5. EDN: KIGZDF
2. 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>
3. Зацаринный А.А., Меденников В.И., Райков А.Н. Интеграция приложений искусственного интеллекта в единую цифровую платформу АПК // *Информационное общество*. 2023. № 1. С. 127-138. EDN: NMKKLZ
4. Ялунина Е.Н., Прядилина Н.К., Скворцов Е.А. Совершенствование процесса принятия управленческих решений в сельском хозяйстве с применением систем искусственного интеллекта // *Аграрный вестник Урала*. 2024. Т. 24, № 3. С. 440-449. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-03-440-449>
5. Иксанов Р.А., Владимиров И.А., Гиззатуллин Р.Х. Влияние внедрения технологий искусственного интеллекта на ресурсосбережение в сельском хозяйстве // *Вестник КрасГАУ*. 2025. № 3(216). С. 131-139. <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2025-3-131-139>
6. Черноиванов В.И., Толоконников Г.К. Агрокиборг как биомашсистема // *Техника и оборудование для села*. 2022. № 9 (303). С. 2-5. EDN: YUSXXK
7. Скворцов Е.А., Набоков В.И., Некрасов К.В. и др. Применение технологий искусственного интеллекта в сельском хозяйстве // *Аграрный вестник Урала*. 2019. № 8(187). С. 91-98. https://doi.org/10.32417/article_5d908ed78f7fc7.89378141
8. Кирсанов В.В., Цой Ю.А. Тенденции развития биотехнических систем в животноводстве // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14, № 3. С. 27-32. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2020-14-3-27-32>
9. Jha K., Doshi A., Patel P., Shah M. A comprehensive review on automation in agriculture using artificial intelligence. *Artificial Intelligence in Agriculture*. 2019;2:1-12. <https://doi.org/10.1016/j.aiaa.2019.05.004>
10. Будзко В.И., Меденников В.И. Системный анализ образовательных цифровых экосистем в АПК // *Системы высокой доступности*. 2023. Т. 19, № 1. С. 46-58. EDN: KEXDUB
11. Павленко Е.Ю. Алгоритм предсказания связей в саморегулирующейся сети с адаптивной топологией на базе теории графов и машинного обучения // *Моделирование и анализ информационных систем*. 2023. Т. 30, № 4. С. 288-307. <https://doi.org/10.18255/1818-1015-2023-4-288-307>
12. Соловов А.В., Меньшикова А.А. Когнитивное моделирование процессов адаптивного обучения // *Онтология проектирования*. 2024. Т. 14, № 2 (52). С. 181-195. <https://doi.org/10.18287/2223-9537-2024-14-2-181-195>
13. Кирсанов В.В., Дорохов А.С., Иванов Ю.А. Графоаналитическая оценка функционирования локальных биотехнических систем в животноводстве // *Агроинженерия*. 2023. Т. 25, № 2. С. 4-9. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-2-4-9>
14. Раевская Е.Г. Применение искусственного интеллекта в сельском хозяйстве Китая (обзор) // *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2024. Т. 25, № 5. С. 739-753. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.5.739-753>
15. Gill S.S., Goel S., Macovei A. et al. The agritech revolution: Artificial intelligence reshaping the agriculture. *Current Plant Biology*. 2025;44:100554. <https://doi.org/10.1016/j.cpb.2025.100554>

References

1. Lobachevskiy Ya.P., Lachuga Yu.F., Izmaylov A.Yu., Shogenov Yu.Kh. Scientific and technical achievements of agricultural engineering organizations in the context of digital transformation of agriculture. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2023;4(310):2-5. (In Russ.)
2. 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>
3. Zatsarinny A.A., Medennikov V.I., Raikov A.N. Integration of agricultural artificial intelligence applications into a single digital platform. *Information Society*. 2023;1:127-138. (In Russ.)
4. Yalunina E.N., Pryadilina N.K., Skvorcov E.A. Improving the process of making management decisions in agriculture using artificial intelligence systems. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2024;24(3):440-449. (In Russ.) <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-03-440-449>
5. Iksanov R.A., Vladimirov I.A., Gizzatullin R.Kh. The impact of implementing artificial intelligence technologies on resource saving in agriculture. *Bulletin of KSAU*. 2025;3:131-139. (In Russ.) <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2025-3-131-139>
6. Chernov Ivanov V.I., Tolokonnikov G.K. Agrocyborg as a bio-machine system. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2022;9(303):2-5. (In Russ.)
7. Skvorcov E.A., Nabokov V.I., Nekrasov K.V. et al. Application of technologies of artificial intelligence in agriculture. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2019;8:91-98. (In Russ.) https://doi.org/10.32417/article_5d908ed78f7fc7.89378141
8. Kirsanov V.V., Tsoi Yu.A. Trends in the development of biotechnical systems in animal husbandry. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2020;14(3):27-32. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2020-14-3-27-32>
9. Jha K., Doshi A., Patel P., Shah M. A comprehensive review on automation in agriculture using artificial intelligence. *Artificial Intelligence in Agriculture*. 2019;2:1-12. <https://doi.org/10.1016/j.aiaa.2019.05.004>
10. Budzko V.I., Medennikov V.I. System analysis of educational digital ecosystems in the agro-industrial complex. *Highly Available Systems*. 2023;19(1):46-58. (In Russ.)
11. Pavlenko E.Y. Algorithm for link prediction in self-regulating network with adaptive topology based on graph theory and machine learning. *Modeling and Analysis of Information Systems*. 2023;30(4):288-307. (In Russ.) <https://doi.org/10.18255/1818-1015-2023-4-288-307>
12. Solovov A.V., Menshikova A.A. Cognitive modeling of adaptive learning processes. *Ontology of Designing*. 2024;14(2):181-195. <https://doi.org/10.18287/2223-9537-2024-14-2-181-195>
13. Kirsanov V.V., Dorokhov A.S., Ivanov Yu.A. Graph analytics of the performance of local biotechnical systems in animal husbandry. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2023;25(2):4-9. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-2-4-9>
14. Raevskaya E.G. Introducing artificial intelligence in Chinese agriculture (review). *Agricultural Science Euro-North-East*. 2024;25(5):739-753. (In Russ.) <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.5.739-753>
15. Gill S.S., Goel S., Macovei A. et al. The agritech revolution: Artificial intelligence reshaping the agriculture. *Current Plant Biology*. 2025;44:100554. <https://doi.org/10.1016/j.cpb.2025.100554>
16. Kirsanov V.V., Pavkin D.Yu., Vladimirov F.E. et al. Monitoring and control of the "Animal" subsystem in the complex biotechnical system "Man-Machine-Animal" of a dairy farm.

16. Кирсанов В.В., Павкин Д.Ю., Владимиров Ф.Е. и др. Контроль и управление подсистемой «животное» в сложной биотехнической системе «Человек-машина-животное» молочной фермы // *Агроинженерия*. 2020. № 6 (100). С. 6-10. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2020-6-4-10>

17. Дубровский Д.И. Задача создания общего искусственного интеллекта и проблема сознания // *Философские науки*. 2021. Т. 64, № 1. С. 13-44. <https://doi.org/10.30727/0235-1188-2021-64-1-13-44>

18. Ezanno P., Picault S., Beaunée G. et al. Research perspectives on animal health in the era of artificial intelligence. *Veterinary Research*. 2021;52:40. <https://doi.org/10.1186/s13567-021-00902-4>

19. Han Z., Cheng L., Tian L., Xing L. A graph theory-based optimization design for complex manufacturing processes. *IEEE Access*. 2020;8:95547-95558. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2991218>

Сведения об авторах

¹ **Дорохов Алексей Семенович**, академик РАН, д-р техн. наук; dorokhov.vim@yandex.ru; <http://orcid.org/0000-0002-4758-3843>; SPIN-код: 6711-8971

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

⁴ **Кирсанов Сергей Владимирович**, аспирант; kirseryii@mail.ru; SPIN-код: 1673-0830

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

Вклад авторов

Дорохов А.С. – методология, руководство исследованиями; Кирсанов В.В. – концептуализация, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование; Баишева Р.А. – создание черновика рукописи; Кирсанов С.В. – ресурсы, визуализация.

Конфликт интересов

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

Статья поступила 17.10.2025, после рецензирования и доработки – 12.12.2025; принята к публикации 25.12.2025

Agricultural Engineering (Moscow). 2020;(6):4-10. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2020-6-4-10>

17. Dubrovsky D.I. The task of the creation of artificial general intelligence and the problem of consciousness. *Russian Journal of Philosophical Sciences*. 2021;64(1):13-44. (In Russ.) <https://doi.org/10.30727/0235-1188-2021-64-1-13-44>

18. Ezanno P., Picault S., Beaunée G. et al. Research perspectives on animal health in the era of artificial intelligence. *Veterinary Research*. 2021;52:40. <https://doi.org/10.1186/s13567-021-00902-4>

19. Han Z., Cheng L., Tian L., Xing L. A graph theory-based optimization design for complex manufacturing processes. *IEEE Access*. 2020;8:95547-95558. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2991218>

Author Information

Aleksey S. Dorokhov¹, Full Member of the Russian Academy of Sciences, DSc (Eng); dorokhov.vim@yandex.ru; <http://orcid.org/0000-0002-4758-3843>; Scopus ID: 57218106496

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

Ravza A. Baisheva³, CSc (Eng), Lead Specialist; rozamamedova@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0001-9145-4478>

Sergey V. Kirsanov⁴, postgraduate student; kirseryii@mail.ru
^{1,2,3,4} Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 109428, Russian Federation, Moscow, 1st Institutsky Proyezd, 5

Author Contribution

A.S. Dorokhov – methodology, research supervision; V.V. Kirsanov – conceptualization, writing – review and editing of the manuscript; R.A. Baisheva – writing – original draft; S.V. Kirsanov – resources, visualization

Conflict of interests

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

Received 17.10.2025; Revised 12.12.2025; Accepted 25.12.2025

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.151:004.8

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-1-26-35>**Интеллектуализация технологических систем
агропромышленного комплекса: Индустрия 4.0****И.В. Петухов^{1✉}, Л.А. Стешина², И.С. Стешин³**^{1,2,3} Поволжский государственный технологический университет; г. Йошкар-Ола, Россия¹ Petuhoviv@volgatech.net[✉]; <https://orcid.org/0009-0000-2365-4857>² SteshinaLA@volgatech.net; <https://orcid.org/0009-0006-1526-991X>³ ilyasteshinm@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0009-4241-3798>

Аннотация. Цифровая трансформация агропромышленного комплекса (АПК) в рамках парадигмы «Индустрия 4.0» невозможна без широкого внедрения технологий искусственного интеллекта. Несмотря на появление подхода «Умное земледелие» и концепции «Сельское хозяйство 5.0», внедрение технологий искусственного интеллекта в АПК носит фрагментарный характер, а их масштабирование затруднено в связи с методологическими, техническими и организационными барьерами. Целью исследований является обзор существующих подходов интеллектуализации технологического оборудования АПК, оценки применимости и перспективности подходов, а также ограничений, препятствующих массовому практическому использованию. Проведен анализ отечественных и зарубежных публикаций, раскрывающих понятия «автоматизация», «цифровизация» и «интеллектуализация» в АПК. С использованием конвергентного подхода проведено когнитивно-семантическое исследование известных подходов применения интеллектуализации в АПК. В результате обзора выделены основные барьеры масштабирования технологий интеллектуализации: отсутствие единого формализованного подхода к внедрению систем интеллектуализации; высокие первоначальные инвестиции, ключевая ставка и налоговая нагрузка; отсутствие единых стандартов данных; закрытость программных решений производителей техники; проблема совместимости оборудования; зависимость от импорта; недостаточная развитость отечественных IT-решений для АПК; нехватка специалистов с междисциплинарными компетенциями. Преодоление выявленных барьеров будет способствовать успешной цифровой трансформации АПК. Разработанная модель хайп-цикла Гартнера, визуализирующая этапы развития технологий интеллектуализации в АПК в ближайшие 10 лет, показывает их стратегическую роль в глобальной продовольственной безопасности. Сделан вывод о необходимости локальной интеллектуализации элементов технологической системы на основе агентного моделирования и надсистемных решений для интеграции разрозненных элементов в единый контур управления.

Ключевые слова: умное земледелие; сельское хозяйство; Индустрия 4.0; цифровизация; интеллектуализация технологических систем агропромышленного комплекса

Финансирование. Исследования выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-19-00568 «Методы и интеллектуальная система поддержки динамической устойчивости операторов эргатических систем»; <https://rscf.ru/project/23-19-00568/>.

Для цитирования: Петухов И.В., Стешина Л.А., Стешин И.С. Интеллектуализация технологических систем агропромышленного комплекса: Индустрия 4.0 // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 1. С. 26-35. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-1-26-35>

ORIGINAL ARTICLE

Intellectualization of technological systems in agriculture: Industry 4.0**I.V. Petukhov^{1✉}, L.A. Steshina², I.S. Steshin³**^{1,2,3} Volga State University of Technology; Yoshkar-Ola, Russia¹ Petuhoviv@volgatech.net[✉]; <https://orcid.org/0009-0000-2365-4857>² SteshinaLA@volgatech.net; <https://orcid.org/0009-0006-1526-991X>³ ilyasteshinm@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0009-4241-3798>

Abstract. The digital transformation of the agro-industrial sector within the “Industry 4.0” paradigm is impossible without the widespread adoption of artificial intelligence (AI) technologies. Despite the emergence of the “smart

farming” approach and the “Agriculture 5.0” concept, the adoption of AI in agriculture remains fragmented due to methodological, technical, and organizational barriers. The study aims to review existing approaches to the intellectualization of agricultural machinery and equipment, evaluating their advantages, practical implementation, and scalability limitations. The authors conducted a bibliometric analysis and preformed terminological mapping of key concepts (“automation,” “digitalization,” “intellectualization”) across Russian and English scientific literature. Using a convergent cognitive-semantic approach, they have examined current intellectualization strategies in the agro-industrial sector. The review identified the main barriers to technology scaling, including the lack of a unified formalized approach to the implementation of intelligent systems; high initial investments, key interest rates, and tax burdens; the lack of unified data standards; the proprietary nature of software solutions from equipment manufacturers; equipment compatibility issues; import dependency; the underdevelopment of domestic IT solutions for the agro-industrial sector; and a shortage of specialists with interdisciplinary competencies. Overcoming these identified barriers will facilitate the successful digital transformation of the sector. A Gartner Hype Cycle model was developed to visualize the development stages of intellectualization technologies in the agro-industrial sector over the next 10 years, highlighting their strategic role in global food security. The study concludes that there is a need for local intellectualization of technological system elements based on agent-based modeling, along with supra-systemic solutions to integrate disparate elements into a unified control loop.

Keywords: smart farming; agriculture; Industry 4.0; digitalization; intellectualization of technological systems in the agro-industrial sector

Funding: This research was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 23-19-00568, “Methods and an Intelligent System for Supporting the Dynamic Stability of Ergatic System Operators,” <https://rscf.ru/project/23-19-00568/>.

For citation: Petukhov I.V., Steshina L.A., Steshin I.S. Intellectualization of technological systems in agriculture: Industry 4.0. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(1):26-35 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-1-26-35>

Введение

Цифровизация и интеллектуализация технологических процессов – естественный эволюционный тренд, связанный с развитием современных информационных технологий и систем искусственного интеллекта (ИИ). Многие системы ИИ базируются на принципах автоматизации с применением машинного зрения, нейронных сетей и экспертных систем. Их интеграция приводит к качественным изменениям. Принципиально меняются подходы проектирования и управления технологическими инновациями, человеко-машинного взаимодействия, наблюдается общая интеграция киберфизических систем в производственные и технологические процессы. Современная концепция человеко-машинной интеграции [1] позволяет на другом уровне пересмотреть взаимодействие человека и техники, а агентно-ориентированный подход [2] допускает внедрение технологии интеллектуализации практически в любой технологический объект. Все это позволяет говорить о начале масштабной трансформации, инициированной четвертой промышленной революцией «Индустрия 4.0», и о формировании концепции «Сельское хозяйство 4.0» [3]. Однако прямолинейный перенос промышленных стандартов в агропромышленный комплекс (АПК) является некорректным, поэтому требуется критический анализ отраслевых различий

между промышленностью и сельским хозяйством, применимости технологий и их практической оправданности [4]. В научных публикациях, рассматривающих концепции «Умное земледелие» и «Сельское хозяйство 5.0» [5], наблюдается лишь фрагментарный характер внедрения, а между успешными кейсами на уровне пилотных проектов и их масштабированием до промышленного уровня наблюдается значительный разрыв.

Таким образом, существует острая необходимость в анализе технологий интеллектуализации и цифровизации для создания интеллектуальных, автономных, устойчивых и высокопроизводительных агропродовольственных систем. Несмотря на значительный потенциал для повышения эффективности отрасли, путь внедрения этих технологий до сих пор сопряжен с многочисленными трудностями [6]. В связи с этим представленные исследования направлены на выявление ограничений в распространении технологий интеллектуализации в сельском хозяйстве.

Цель исследований: обзор существующих подходов интеллектуализации технологического оборудования агропромышленного комплекса, оценки их применимости и перспективности, а также ограничений, препятствующих массовому практическому использованию.

Результаты и их обсуждение

Исследованию перспектив и возможностей автоматизации, цифровизации и интеллектуализации агропромышленного комплекса посвящено большое количество публикаций. На июнь 2025 г. сервис Google Академия при запросе «Автоматизация агропромышленного комплекса» выдал 19 100 публикаций в русскоязычном сегменте, на запросы «Цифровизация агропромышленного комплекса» и «Интеллектуализация агропромышленного комплекса» – 16 700 и 1 430 публикаций соответственно. В англоязычном сегменте интернет-ресурса также наблюдаются значительные различия в количестве публикаций по данной теме. Очевидно, различия терминологического аппарата обуславливают отличия в частоте его использования в научных публикациях. При этом смысловая нагрузка в используемых терминах достаточно идентична. Отсюда следует, что анализ современного состояния исследований по данной проблеме осложнен различиями в терминологическом и понятийном аппаратах. Проблема осложняется тем, что если для термина «автоматизация» существует определение, формализованное в ГОСТ 33707-2016 (ISO/IEC2382:2015), то для терминов «цифровизация» и «интеллектуализация» стандартных определений не дано.

Анализ эволюции ключевых концепций от «автоматизации» через «цифровизацию» к «интеллектуализации» позволил сделать вывод: если ранее доминировали исследования по автоматизации, то в последние 5 лет фокус сместился в сторону

цифровизации. При этом оценка количества статей по различным ключевым словам за последние 5 лет выявила опережающий рост научной активности в области ИИ для АПК в англоязычном сегменте по сравнению с русскоязычным.

Термин «интеллектуализация» используется как обобщающий маркер внедрения технологий ИИ: от агроботов и цифровых платформ до интеллектуализированных систем мониторинга [7, 8]. Существует два аспекта этого понятия: технологический, подразумевающий комплексную автоматизацию и роботизацию с использованием систем поддержки принятия решений [9], и функциональный – для обеспечения автономности и адаптивности технических систем¹. Таким образом, под интеллектуализацией предлагается понимать процесс внедрения технологий ИИ, обеспечивающих автоматизированный контроль и управление с повышенным уровнем автономности и адаптивности системы.

Для систематизации понятийного аппарата проведем сравнительный анализ терминов (табл.).

Проведенный анализ позволяет определить взаимосвязь ключевых концепций: автоматизация формирует базис управления, цифровизация создает модели работы с данными, а интеллектуализация обеспечивает интеграцию ИИ, придавая системам способность к прогнозированию и автономному принятию решений с учетом повышения размерности факторного пространства. Эта конвергенция технологий находит свое воплощение в концепциях «Индустрия 4.0» и «Сельское хозяйство 4.0».

Таблица

Сравнительный анализ терминов «автоматизация», «цифровизация», «интеллектуализация»

Table

Comparative analysis of the terms “automation,” “digitalization,” and “intellectualization”

Характеристика	Автоматизация	Цифровизация	Интеллектуализация
Концепция	Замена ручного труда машинным	Перевод информации и процессов в «цифру»	Автономность и адаптивность
Цель	Повышение быстродействия, надежности и уменьшение количества ошибок по вине человека в формализованных процессах в режиме монотонной деятельности	Оптимизация и накопление данных для анализа и моделирования; вертикальная интеграция систем управления и создание цифровой среды для управления	Анализ, прогнозирование, принятие решений на основе анализа больших данных в стохастических системах; переход к автономному решению сложных задач
Фокус	Процесс в категориях «Вход-выход»	Данные, информация и информационные потоки	Большие данные, выделение знаний, генерация решений
Уровень интеллекта	Жесткая логика, нулевой или минимальный уровни	Минимальный со структурированными данными	Максимальный с нечеткими и неполными данными
Используемые технологии	Роботизация, программируемые логические контроллеры	IoT, сети, облака	ИИ (ML, DL, NLP, CV), Big Data Analytics

¹ Russell S.J., Norvig P. Artificial intelligence a modern approach. Third Edition. London, 2010. 1132 p.

В контексте государственной политики цифровой трансформации АПК ключевым ориентиром выступает отраслевой проект Минсельхоза РФ «Цифровое сельское хозяйство». Его целевые показатели и индикаторы задают вектор для практической реализации рассмотренных концепций. Достижение этих показателей возможно через последовательное движение по уровням интеллектуализации: от базовой автоматизации и оцифровки данных (формирование «цифрового следа») к внедрению систем поддержки принятия решений на основе ИИ, и в конечном итоге – к созданию интегрированных киберфизических систем. Реализация проекта предполагает развитие цифровой инфраструктуры (включая связь и навигацию), создание и популяризацию отечественных цифровых сервисов, а также подготовку кадров, что напрямую направлено на преодоление многих выявленных в исследованиях экономических, технических и кадровых барьеров. В этих условиях концептуальной основой для поэтапного выполнения задач отраслевого проекта может служить предлагаемая в работе модель интеллектуализации, включающая в себя 3 уровня:

- локальный – внедрение ИИ в исполнительные устройства, датчики и системы обработки первичной информации [10, 11], что можно рассматривать как развитие традиционной автоматизации;
- интерфейсный – применение ИИ для поддержки операторской деятельности включая мониторинг и контроль оператора [12, 13];

– глобальный – создание интегрирующей «надсистемы», координирующей все уровни и соответствующей перспективной концепции «Сельское хозяйство 5.0» [14, 15].

Сложность реализации возрастает от локального уровня к глобальному, а массовое внедрение технологий интеллектуализации сдерживается комплексом взаимосвязанных технологических и организационных барьеров.

Успешные кейсы интеллектуализации встречаются в сельскохозяйственной инфраструктуре (в системах электро- [16, 17], водо- [18], газоснабжения [19], учета и контроля активов) [20]; в технике (повышение эффективности работы, ремонта и технического обслуживания парка сельскохозяйственных машин) [21]; в технологических процессах (внедрение IoT-платформ [22], ГИС [23], технологий компьютерного зрения [24], беспилотной техники и методов точной локализации) [25, 26]; при подготовке персонала (использование ИИ для обучения операторов) [27, 28].

Несмотря на наличие успешных кейсов, процесс носит фрагментарный характер, что требует не только структуризации существующих методологий, но и комплексного анализа системных ограничений, препятствующих массовому практическому использованию.

Рассмотрим внедрение идеологии интеллектуализации и технологий ИИ с позиции системного анализа и хайп-цикла Гартнера (рис. 1). Анализ цикла

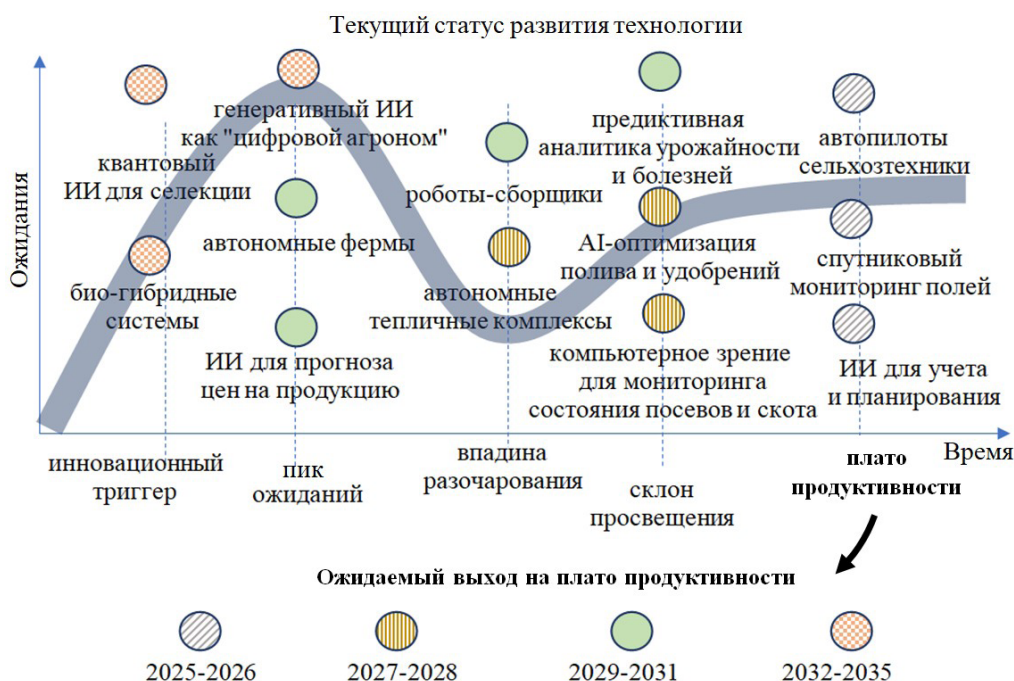


Рис. 1. Схема хайп-цикла Гартнера ИИ технологий агропромышленного комплекса

Fig. 1. Gartner Hype Cycle for AI technologies in the agro-industrial sector

позволяет оценить не только зрелость технологий, но и их применимость, перспективность и потенциальный экономический эффект для АПК.

На рисунке 1 выделены 5 основных фаз развития технологий в АПК. Наибольшего практического внедрения добились системы спутникового мониторинга полей и автоматического вождения сельхозтехники: согласно совместному исследованию НИУ ВШЭ и АНО «Диалог Регионы» их используют более 60% крупных российских агрохолдингов. Их применимость высока, а эффект выражается в снижении затрат на ГСМ, экономии рабочего времени, что в совокупности дает прямой экономический эффект в 20...30% на соответствующих операциях [29].

На стадии предпромышленного внедрения находятся решения на основе предиктивной аналитики, использующие ретроспективные данные для прогнозирования урожайности и оптимизации полива [30]. Их перспективность связана с переходом от реактивного к проактивному управлению, а ожидаемый эффект – оптимизация затрат на семена, удобрения и воду на 25...38% за счет более точного дозирования и своевременности применения [29].

На пике ожиданий находится генеративный ИИ в роли «цифрового агронома», чья практическая ценность требует дальнейшей верификации. Потенциальная применимость видится в автоматизации составления технологических карт, сценариев развития агроситуаций, однако для достижения эффекта (снижение нагрузки на высококвалифицированных специалистов, ускорение принятия решений) необходима качественная отечественная база знаний. В то же время полностью автономные фермы, несмотря на первоначальные ожидания, демонстрируют чрезмерную стоимость и сложность, что препятствует их масштабированию [31].

Таким образом, хайп-цикл наглядно показывает, что максимальный и быстрый эффект от интеллектуализации достигается не на самых «модных» технологиях, а на тех, что прошли этап пилотов и адаптированы к реальным условиям и экономике АПК.

Сдерживающими факторами выступают многоуровневые барьеры: методологические, экономические, технические, организационные и кадровые.

На методологическом уровне ключевой проблемой является отсутствие единого формализованного подхода к внедрению систем интеллектуализации. Сложности усугубляются необходимостью сохранения человека-оператора в контуре управления [32], потребностью в предварительном комплексном анализе агротехнических систем [33] и оценкой

отраслевой готовности к цифровой трансформации [34].

Экономические ограничения связаны с высокими первоначальными инвестициями, малодоступными для большинства малых и средних хозяйств [35], макроэкономическими факторами в виде ключевой ставки и налоговой нагрузки [36]. Решением являются различные грантовые программы, направленные на развитие семейных ферм и материально-технической базы организаций, а также на инвестиционные проекты. Перспективной видится разработка типовых решений внедрения технологий ИИ в АПК, адаптируемых к конкретному субъекту, что вкупе с созданием государственной информационной системы цифровых сервисов агропромышленного комплекса создаст необходимую основу цифровой трансформации АПК. Однако анализ межотраслевых связей показывает, что АПК со своим 5...6%-ным вкладом в ВВП, оставаясь крупным потребителем продукции смежных отраслей, слабо интегрирован с высокотехнологичным сектором, а цепочки создания стоимости имеют разрывы в наиболее технологически сложных звеньях. Разрывы связей напрямую связаны с существующими технологическими барьерами: отсутствием единых стандартов данных и их низкой релевантностью [37]; закрытостью программных решений ведущих производителей техники как средством защиты своего рынка²; проблемой совместимости оборудования по причине разнородных стандартов [38]; зависимостью от импорта в критических технологических звеньях [39]; неравномерностью распределения ИТ-ресурсов между регионами Российской Федерации [40].

Несмотря на то, что переход на Industrial Ethernet [41] в перспективе обеспечит унификацию систем управления, его практическая реализация требует разработки специализированных решений, устойчивых к характерным для сельхозтехники условиям эксплуатации.

Организационные, правовые и кадровые барьеры формируют дополнительный контур проблем. Например, отмечаются правовые и этические аспекты использования ИИ в корпоративном управлении [42]. Применительно к АПК ключевым организационным ограничением выступает сопротивление персонала, вызванное неприятием усиления контроля и «прозрачности» процессов [43]. Правовые и этические риски включают в себя вопросы ответственности

²Baillie C. et al. Review of technologies, regulations and operating standards for field based autonomous agricultural machinery. University of Southern Queensland, 2020. 100 p. <https://doi.org/10.26192/q797q>

за решения ИИ, связанные с климатом, относящиеся к неточности данных, техническим ошибкам, основанным на неправильных рекомендациях, а также конфиденциальности данных и прав собственности на них [44].

Кадровый дефицит проявляется в острой нехватке специалистов с междисциплинарными компетенциями на стыке агрономии, *datascience* и IT, особенно в сельской местности [45]. Качество данных, критически важное для работы ИИ, напрямую зависит от квалификации персонала. При этом развитие человеческого капитала в условиях цифровизации сельского хозяйства может обеспечить рост экономической эффективности сельскохозяйственной отрасли [46].

Таким образом, с учетом прогноза по модели хайп-цикла Гартнера и выявленных системных барьеров ближайшая перспектива развития агропромышленного кластера связана с поэтапным преодолением этих ограничений. Согласно представленному сценарию (рис. 2) развитие интеллектуализации АПК будет осуществляться в 3 этапа:

1. Этап технологической адаптации (2025-2027 гг.): массовое внедрение апробированных решений (IoT-сенсоров для мониторинга, роботизации операций и автопилотов сельхозтехники). Критическими условиями являются развитие цифровой инфраструктуры (5G, ГЛОНАСС) и формирование массивов данных для базового прогнозирования урожайности.

2. Этап интеграции (2028-2031 гг.): создание единого цифрового контура управления на основе платформы «Цифровой двойник», интегрирующей данные от поля до логистики. Внедрение генеративного ИИ в качестве ассистента агронома для оптимизации севооборотов и защиты растений.

3. Этап автономизации (2031-2035 гг.): формирование автономных агроэкосистем с полной роботизацией полевых работ включая беспилотную технику (UVs) и логистические системы под управлением ИИ. Развитие замкнутых производств с использованием ИИ-ассистентов селекции для создания адаптивных сортов и минимизации экологического следа.



Рис. 2. Сценарий развития агропромышленного кластера с применением технологий интеллектуализации

Fig. 2. Development roadmap for an agro-industrial sector using intellectualization technologies

Выводы

Проведенный анализ выявил системный характер барьеров интеллектуализации АПК, характерный для большинства производственных отраслей. Несмотря на признанный потенциал ИИ, на текущем

этапе развития можно реализовывать лишь локальную интеллектуализацию отдельных технологических процессов.

Внедрение ИИ перестало быть опциональным и превратилось в ключевой фактор

конкурентоспособности агропредприятий в условиях растущих климатических и демографических вызовов.

Акцент дальнейших исследований должен сместиться с дискуссий о целесообразности ИИ на разработку практических стратегий поэтапной трансформации, сочетающих локальную интеллектуализацию элементов технологической системы на основе

агентного моделирования и создания надсистемных решений для интеграции разрозненных элементов в единый контур управления. Такой двухуровневый подход позволит достичь системного эффекта в обозримой перспективе, обеспечив переход от точечных улучшений к комплексной цифровой трансформации отрасли.

Список источников

1. Стешина Л.А., Петухов И.В. Концепция человеко-ориентированного проектирования сложных технических систем // Современные наукоемкие технологии. 2023. № 7. С. 92-96. <https://doi.org/10.17513/snt.39700>
2. Din A., Ismail M., Shah B. et al. A deep reinforcement learning-based multi-agent area coverage control for smart agriculture. *Computers and Electrical Engineering*. 2022;101:108089. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2022.108089>
3. Fasciolo B., Panza L., Lombardi F. Exploring the integration of Industry 4.0 technologies in agriculture: A comprehensive bibliometric review. *Sustainability*. 2024;16(20):8948. <https://doi.org/10.3390/su16208948>
4. Bernhardt H., Bozkurt M., Brunschett R. et al. Challenges for agriculture through Industry 4.0. *Agronomy*. 2021;11(10):1935. <https://doi.org/10.3390/agronomy11101935>
5. Mishra S., Asha T., Rai C.K. Agriculture 5.0: Applications of artificial intelligence and internet of things. *Indian Agriculture: Challenges, Priorities and Solutions*. Springer, Singapore. 2025:283-297. https://doi.org/10.1007/978-981-96-5273-0_13
6. Arora C., Kamat A., Shanker S., Barve A. Integrating agriculture and industry 4.0 under «agri-food 4.0» to analyze suitable technologies to overcome agronomical barriers. *British Food Journal*. 2022;124(7):2061-2095. <https://doi.org/10.1108/BFJ-08-2021-0934>
7. Погонышев В.А., Погонышева Д.А., Ульянова Н.Д. Вопросы эксплуатации сельскохозяйственной техники в условиях интеллектуализации АПК // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. 2024. № 6 (106). С. 54-59. EDN: OPSORS
8. Мурзаев Е.А., Шаблыкин И.Н. Научные принципы разработки интеллектуализированных систем мониторинга и управления технологическими процессами в органическом производстве // АгроЭкоИнженерия. 2024. № 4 (121). С. 86-100. EDN: EPDTFD
9. Чупина И.П., Фатеева Н.Б., Петрова Л.Н. Процессы развития автоматизации и информатизации в сельском хозяйстве страны // Аграрное образование и наука. 2019. № 3. С. 21. EDN: LMSAZJ
10. Misra N.N., Dixit Y., Al-Mallahi A. et al. IoT, big data, and artificial intelligence in agriculture and food industry. *IEEE Internet of things Journal*. 2020;9(9):6305-6324. <https://doi.org/10.1109/IIOT.2020.2998584>
11. Shafik W. Barriers to implementing computational intelligence-based agriculture system. *Computational Intelligence in Internet of Agricultural Things*. Cham, Springer, 2024. Pp. 193-219. https://doi.org/10.1007/978-3-031-67450-1_8
12. Benos L., Moysiadis V., Kateris D. et al. Human-robot interaction in agriculture: A systematic review. *Sensors*. 2023;23(15):6776. <https://doi.org/10.3390/s23156776>
13. Rehman A., Saba T., Kashif M. et al. A revisit of internet of things technologies for monitoring and control strategies in smart agriculture. *Agronomy*. 2022;12(1):127. <https://doi.org/10.3390/agronomy12010127>

References

1. Steshina L.A., Petukhov I.V. Concept of human-oriented design of complex technological systems. *Modern high technologies*. 2023;7:92-96. (In Russ.) <https://doi.org/10.17513/snt.39700>
2. Din A., Ismail M., Shah B. et al. A deep reinforcement learning-based multi-agent area coverage control for smart agriculture. *Computers and Electrical Engineering*. 2022;101:108089. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2022.108089>
3. Fasciolo B., Panza L., Lombardi F. Exploring the integration of Industry 4.0 technologies in agriculture: A comprehensive bibliometric review. *Sustainability*. 2024;16(20):8948. <https://doi.org/10.3390/su16208948>
4. Bernhardt H., Bozkurt M., Brunschett R. et al. Challenges for agriculture through Industry 4.0. *Agronomy*. 2021;11(10):1935. <https://doi.org/10.3390/agronomy11101935>
5. Mishra S., Asha T., Rai C.K. Agriculture 5.0: Applications of artificial intelligence and internet of things. *Indian Agriculture: Challenges, Priorities and Solutions*. Springer, Singapore. 2025:283-297. https://doi.org/10.1007/978-981-96-5273-0_13
6. Arora C., Kamat A., Shanker S., Barve A. Integrating agriculture and industry 4.0 under «agri-food 4.0» to analyze suitable technologies to overcome agronomical barriers. *British Food Journal*. 2022;124(7):2061-2095. <https://doi.org/10.1108/BFJ-08-2021-0934>
7. Pogonyshchev V.A., Pogonyshcheva D.A., Ulyanova N.D. Operating issues of agricultural machinery in the conditions of intellectualization of the agro-industrial complex. *Vestnik Bryanskoy GSKhA*. 2024;6:54-59. (In Russ.)
8. Murzaev E.A., Shablykin I.N. Scientific principles for creating intellectualized systems to monitor and control technological processes in organic production. *AgroEkoInzheneriya*. 2024;4:86-100. (In Russ.)
9. Chupina I.P., Fateeva N.B., Petrova L.N. Processes of development of automation and informatization in agriculture of the country. *Agrarnoe obrazovanie i nauka*. 2019;3:21. (In Russ.)
10. Misra N.N., Dixit Y., Al-Mallahi A. et al. IoT, big data, and artificial intelligence in agriculture and food industry. *IEEE Internet of things Journal*. 2022;9(9):6305-6324. <https://doi.org/10.1109/IIOT.2020.2998584>
11. Shafik W. Barriers to implementing computational intelligence-based agriculture system. *Computational Intelligence in Internet of Agricultural Things*. Cham, Springer. 2024;193-219. https://doi.org/10.1007/978-3-031-67450-1_8
12. Benos L., Moysiadis V., Kateris D. et al. Human-robot interaction in agriculture: A systematic review. *Sensors*. 2023;23(15):6776. <https://doi.org/10.3390/s23156776>
13. Rehman A., Saba T., Kashif M. et al. A revisit of internet of things technologies for monitoring and control strategies in smart agriculture. *Agronomy*. 2022;12(1):127. <https://doi.org/10.3390/agronomy12010127>
14. Kumar A. et al. Smart Crop Selection: Harnessing Machine Learning for Sustainable Agriculture in the Era of Industry 5.0. In: A. Chakir, R. Bansal, M. Azzouazi (eds) *Industry 5.0 and Emerging Technologies. Studies in Systems, Decision and Control*. 2024;565:111-134. https://doi.org/10.1007/978-3-031-70996-8_6

14. Kumar A. et al. Smart crop selection: Harnessing machine learning for sustainable agriculture in the era of Industry 5.0. In: A. Chakir, R. Bansal, M. Azzouazi (eds) *Industry 5.0 and Emerging Technologies. Studies in Systems, Decision and Control*. 2024;565:111-134. https://doi.org/10.1007/978-3-031-70996-8_6
15. Concepcion R., Ramirez T.J., Alejandrino J. et al. A look at the near future: Industry 5.0 boosts the potential of sustainable space agriculture. 2022 IEEE 14th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment, and Management (HNICEM). IEEE, 2022:1-6. <https://doi.org/10.1109/HNICEM57413.2022.10109559>
16. Ragazou K., Garefalakis A., Zafeiriou E., Passas I. Agriculture 5.0: A new strategic management mode for a cut cost and an energy efficient agriculture sector. *Energies*. 2022;15(9):3113. <https://doi.org/10.3390/en15093113>
17. Протосовицкий И.В., Забелло Е.П., Прищепов М.А., Дайнеко В.А. Обеспечение надежности и эффективности электроэнергетики сельскохозяйственной отрасли республики в современных условиях // *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. 2020. Т. 63, № 2. С. 116-128. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-2-116-128>
18. Preite L., Vignali G. Artificial intelligence to optimize water consumption in agriculture: A predictive algorithm-based irrigation management system. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2024;223;109126. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109126>
19. Belozarov V.V., Voroshilov I.V., Denisov A.N. et al. Nanotechnology of «intellectualization» of energy accounting and suppression of fire-energy harm in engineering systems of residential buildings. Part 2. *Nanotechnologies in Construction*. 2021;13(3):171-180. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2021-13-3-171-180>
20. Ganeshkumar C., Jena S.K., Sivakumar A., Nambirajan T. Artificial intelligence in agricultural value chain: review and future directions. *Journal of Agribusiness in Developing and Emerging Economies*. 2023;13(3):379-398. <https://doi.org/10.1108/JADEE-07-2020-0140>
21. Golubev I.G. Digitalization and use of artificial intelligence technologies in technical modernization of the agro-industrial complex. *E3S Web of Conferences*. EDP Sciences. 2021;291(3):04006. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202129104006>
22. Xu J., Gu B., Tian G. Review of agricultural IoT technology. *Artificial Intelligence in Agriculture*. 2022;6:10-22. <https://doi.org/10.1016/j.aiia.2022.01.001>
23. Raihan A. A systematic review of geographic information systems (GIS) in agriculture for evidence-based decision making and sustainability. *Global Sustainability Research*. 2024;3(1):1-24. <https://doi.org/10.56556/gssr.v3i1.636>
24. Islam R., Habibullah H., Hossain T. AGRI-SLAM: a real-time stereo visual SLAM for agricultural environment. *Autonomous Robots*. 2023;47(6):649-668. <https://doi.org/10.1007/s10514-023-10110-y>
25. Cerro J., Ulloa C., Barrientos A., Rivas J. Unmanned aerial vehicles in agriculture: A survey. *Agronomy*. 2021;11(2):203. <https://doi.org/10.3390/agronomy11020203>
26. Toscano F. et al. Unmanned aerial vehicle for precision agriculture: A review. *IEEE Access*. 2024;12:69188-69205. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3401018>
27. Steshina L., Petukhov I., Glazyrin A. et al. An intelligent virtual environment for training with dynamic parameters. *VSIP'20: Proceedings of the 2nd International Conference on Video, Signal and Image Processing*. 2020. Pp. 79-84. <https://doi.org/10.1145/3442705.3442718>
28. Zhang H., Wu L., Wang J. Research on innovative models of industry-education integration to promote sustainable
15. Concepcion R., Ramirez T.J., Alejandrino J. et al. A look at the near future: Industry 5.0 boosts the potential of sustainable space agriculture. 2022 *IEEE 14th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment, and Management (HNICEM)*. IEEE, 2022:1-6. <https://doi.org/10.1109/HNICEM57413.2022.10109559>
16. Ragazou K. et al. Agriculture 5.0: A new strategic management mode for a cut cost and an energy efficient agriculture sector. *Energies*. 2022;15(9):3113. <https://doi.org/10.3390/en15093113>
17. Protosovitskii I.V., Zabello E.P., Prishchepov M.A., Daineko V.A. Ensuring the reliability and efficiency of the power industry in the agricultural sector of the Republic of Belarus in modern conditions. *Energetika. proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*. 2020;63(2):116-128. (In Russ.) <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-2-116-128>
18. Preite L., Vignali G. Artificial intelligence to optimize water consumption in agriculture: A predictive algorithm-based irrigation management system. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2024;223;109126. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109126>
19. Belozarov V.V. i dr. Nanotechnology of “intellectualization” of energy accounting and suppression of fire-energy harm in engineering systems of residential buildings. Part 2. *Nanotechnology in construction: Scientific Internet magazine*. 2021;13(3):171-180. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2021-13-3-171-180>
20. Ganeshkumar C. et al. Artificial intelligence in agricultural value chain: review and future directions. *Journal of Agribusiness in Developing and Emerging Economies*. 2023;13(3):379-398. <https://doi.org/10.1108/JADEE-07-2020-0140>
21. Golubev I.G. Digitalization and use of artificial intelligence technologies in technical modernization of the agro-industrial complex. *E3S Web of Conferences*. EDP Sciences. 2021;291:04006. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202129104006>
22. Xu J., Gu B., Tian G. Review of agricultural IoT technology. *Artificial Intelligence in Agriculture*. 2022;6:10-22. <https://doi.org/10.1016/j.aiia.2022.01.001>
23. Raihan A. A systematic review of geographic information systems (GIS) in agriculture for evidence-based decision making and sustainability. *Global Sustainability Research*. 2024;3(1):1-24. <https://doi.org/10.56556/gssr.v3i1.636>
24. Islam R., Habibullah H., Hossain T. AGRI-SLAM: a real-time stereo visual SLAM for agricultural environment. *Autonomous Robots*. 2023;47(6):649-668. <https://doi.org/10.1007/s10514-023-10110-y>
25. Cerro J., Ulloa C., Barrientos A., Rivas J. Unmanned aerial vehicles in agriculture: A survey. *Agronomy*. 2021;11(2):203. <https://doi.org/10.3390/agronomy11020203>
26. Toscano F. et al. Unmanned aerial vehicle for precision agriculture: A review. *IEEE Access*. 2024;12:69188-69205. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3401018>
27. Steshina L., Petukhov I., Glazyrin A. et al. An intelligent virtual environment for training with dynamic parameters. *VSIP'20: Proceedings of the 2nd International Conference on Video, Signal and Image Processing*. 2020;79-84. <https://doi.org/10.1145/3442705.3442718>
28. Zhang H., Wu L., Wang J. Research on innovative models of industry-education integration to promote sustainable
29. Baychorova D.N., Selina E.V., Lytnev N.N. Economic efficiency of precision farming using high-tech agricultural machinery. *Journal of Applied Research*. 2024;12:58-64. (In Russ.)

education in agricultural machinery majors. *Sustainable Futures*. 2025;10:101072. <https://doi.org/10.1016/j.sfr.2025.101072>

29. Байчорова Д.Н., Селина Е.В., Лытнев Н.Н. Экономическая эффективность применения точного земледелия с использованием высокотехнологичной сельскохозяйственной техники // *Журнал прикладных исследований*. 2024. № 12. С. 78-84. EDN: KIHPEI

30. Titirmare S., Margal P., Gupta S., Kumar D. AI-powered predictive analytics for crop yield optimization. *Agriculture 4.0*. CRC Press, 2024. Pp. 89-110. <https://doi.org/10.1201/9781003570219-5>

31. Salem D.A., Hassan N.A., Hamdy R.M. Impact of transfer learning compared to convolutional neural networks on fruit detection. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*. 2024;46(4):7791-7803. <https://doi.org/10.3233/JIFS-233514>

32. Чаусов Д.Н., Петухов И.В., Беляев В.В. и др. Программно-аппаратный комплекс оценки эффективности деятельности операторов // *Вестник Московского государственного областного университета. Серия «Физика-Математика»*. 2014. № 2. С. 80-86. EDN: SJDCDJ

33. Chicaiza K., Paredes R.X., Sarzosa I.M. et al. Smart farming technologies: A methodological overview and analysis. *IEEE Access*. 2024;12:164922-164941. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3487497>

34. Nurimbetov R. et al. Multi-level diagnostics of agrarian economy subjects according to the degree of readiness for digital transformations. *Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, 2022;1043(1):012006. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1043/1/012006>

35. Schönberger M. Artificial intelligence for small and medium-sized enterprises: identifying key applications and challenges. *Journal of Business Management*. 2023;21:89-112. <https://doi.org/10.32025/JBM23004>

36. Калицкая В.В., Рыкалина О.А., Вилачева М.Н. и др. Индексация утилизационного сбора и механизмы квотирования импорта: макроэкономические эффекты и влияние на рынок сельхозтехники // *Международный сельскохозяйственный журнал*. 2025. № 5. С. 629-634. EDN: SYJXGO

37. Каличкин В.К., Максимович К.Ю., Алешенко О.А., Алешенко В.В. Прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур: структура данных и методы искусственного интеллекта // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2025. Т. 19, № 2. С. 33-44. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2025-19-2-33-44>

38. Mizik T. How can precision farming work on a small scale? A systematic literature review. *Precision agriculture*. 2023;24(1):384-406. <https://doi.org/10.1007/s11119-022-09934-y>

39. Хейфец Б.А., Чернова В.Ю. Адаптация российского агропродовольственного комплекса к новым геополитическим реалиям // *Проблемы прогнозирования*. 2024. № 5. С. 165-175. <https://doi.org/10.47711/0868-6351-206-165-175>

40. Водяников В.Т., Эдер А.В. Цифровизация АПК: оценка и перспективы внедрения в аграрном секторе экономики страны // *Агроинженерия*. 2024. Т. 26, № 2. С. 49-56. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-2-49-56>

41. Neftissov A., Biloshchytskyi A., Toxanov S., Ordabayev S. Mathematical, software and hardware support of the conceptual model of the information system of precision agriculture. *Scientific Journal of Astana IT University*. 2023;15(15):55-70. <https://doi.org/10.37943/15TKFW1223>

42. Savandha S.D., Fatimah A.F. Santika R. et al. The role of AI in enhancing agricultural labor efficiency: Perspectives from HR managers in agri-tech firms. *Digital Agriculture and Innovation Journal*. 2025;1(1):1-10. <https://doi.org/10.59261/journaldaij.v1i1.1>

30. Titirmare S., Margal P., Gupta S., Kumar D. AI-powered predictive analytics for crop yield optimization. *Agriculture 4.0*. CRC Press, 2024. pp. 89-110. <https://doi.org/10.1201/9781003570219-5>

31. Salem D.A., Hassan N.A., Hamdy R.M. Impact of transfer learning compared to convolutional neural networks on fruit detection. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*. 2024;46(4):7791-7803. <https://doi.org/10.3233/JIFS-233514>

32. Chausov D.N., Petukhov I.V., Belyaev V.V. et al. Hardware-software complex for evaluation of operator's activity. *Bulletin of Moscow Region State University. Series: Physics-Mathematics*. 2014;2:80-86.

33. Chicaiza K., Paredes R.X., Sarzosa I.M. et al. Smart farming technologies: A methodological overview and analysis. *IEEE Access*. 2024;12:164922-164941. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3487497>

34. Nurimbetov R. et al. Multi-level diagnostics of agrarian economy subjects according to the degree of readiness for digital transformations. *Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, 2022;1043(1):012006. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1043/1/012006>

35. Schönberger M. Artificial intelligence for small and medium-sized enterprises: identifying key applications and challenges. *Journal of Business Management*. 2023;21:89-112. <https://doi.org/10.32025/JBM23004>

36. Kalickaya V.V., Rykalina O.A., Vilacheva M.N. et al. Indexation of the disposal fees and import quotas mechanisms: macroeconomic effects and impact on the agricultural machinery market. *Mezhdunarodnyi sel'skhozaystvennyi zhurnal*. 2025;5:629-634. (In Russ.)

37. Kalichkin V.K., Maksimovich K.Yu., Aleshchenko O.A., Aleshchenko V.V. Crop yield prediction: data structure and AI-powered methods. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025;19(2):33-44. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2025-19-2-33-44>

38. Mizik T. How can precision farming work on a small scale? A systematic literature review. *Precision agriculture*. 2023;24(1):384-406. <https://doi.org/10.1007/s11119-022-09934-y>

39. Kheifets B.A., Chernova V.Yu. Adaptation of agriculture to new geopolitical conditions. *Problemy prognozirovaniya*. 2024;5:165-175. (In Russ.) <https://doi.org/10.47711/0868-6351-206-165-175>

40. Vodyannikov V.T., Eder A.V. Assessment and prospects for the digitalization of the agricultural sector of the Russian Economy. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2024;26(2):49-56. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-2-49-56>

41. Neftissov A., Biloshchytskyi A., Toxanov S., Ordabayev S. Mathematical, software and hardware support of the conceptual model of the information system of precision agriculture. *Scientific Journal of Astana IT University*. 2023;15(15):55-70. <https://doi.org/10.37943/15TKFW1223>

42. Savandha S.D., Fatimah A.F. Santika R. et al. The role of AI in enhancing agricultural labor efficiency: Perspectives from HR managers in agri-tech firms. *Digital Agriculture and Innovation Journal*. 2025;1(1):1-10. <https://doi.org/10.59261/journaldaij.v1i1.1>

43. Dara R., Hazrati Fard S.M., Kaur J. Recommendations for ethical and responsible use of artificial intelligence in digital agriculture. *Frontiers in Artificial Intelligence*. 2022;5:884192. <https://doi.org/10.3389/frai.2022.884192>

44. Uddin M., Chowdhury A., Kabir M.A. Legal and ethical aspects of deploying artificial intelligence in climate-smart agriculture. *AI & Society*. 2024;39(1):221-234. <https://doi.org/10.1007/s00146-022-01421-2>

43. Dara R., Hazrati Fard S.M., Kaur J. Recommendations for ethical and responsible use of artificial intelligence in digital agriculture. *Frontiers in Artificial Intelligence*. 2022;5:884192. <https://doi.org/10.3389/frai.2022.884192>
44. Uddin M., Chowdhury A., Kabir M.A. Legal and ethical aspects of deploying artificial intelligence in climate-smart agriculture. *AI & Society*. 2024;39(1):221-234. <https://doi.org/10.1007/s00146-022-01421-2>
45. Azzahra A., Prahitaningtyas S., Afridi F. et al. Recruitment and retention of tech-savvy talent for AI in agriculture: Challenges faced by HR in rural agribusiness. *Digital Agriculture and Innovation Journal*. 2025;1(1):37-47. <https://doi.org/10.59261/journaldaij.v1i1.5>
46. Шелковников С.А., Кузнецова И.Г. Концептуально-методологические основы формирования человеческого капитала в условиях перехода к цифровому сельскому хозяйству // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия «Экономика». 2022. Т. 30, № 1. С. 110-123. <https://doi.org/10.22363/2313-2329-2022-30-1-110-123>

Информация об авторах

- ¹ Петухов Игорь Валерьевич, д-р техн. наук, профессор; Petuhoviv@volgatech.net[✉]; SPIN-код: 6009-1846; <https://orcid.org/0009-0000-2365-4857>; Scopus AuthorID: 23052012800
- ² Стешина Людмила Александровна, канд. техн. наук, доцент; SteshinaLA@volgatech.net; SPIN-код: 3493-0013; <https://orcid.org/0009-0006-1526-991X>; Scopus AuthorID: 56315356200
- ³ Стешин Илья Сергеевич, аспирант, научный сотрудник; ilyasteshinm@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0009-4241-3798>; Scopus AuthorID: Scopus ID: 59553039900
- ^{1, 2, 3} Поволжский государственный технологический университет; 424000, Республика Марий Эл, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3

Вклад авторов

И.В. Петухов – руководство исследованиями, методология; Л.А. Стешина – анализ предметной области, проведение исследований, разработка сценария развития технологий; И.С. Стешин – анализ хайп-цикла Гартнера, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 01.07.2025, после рецензирования и доработки 13.01.2026; принята к публикации 15.01.2026

Author Information

- Igor V. Petukhov**¹, DSc (Eng), Professor; Petuhoviv@volgatech.net[✉]; <https://orcid.org/0009-0000-2365-4857>; ScopusAuthorID: 23052012800
- Liudmila A. Steshina**², CSc (Eng); Associate Professor; SteshinaLA@volgatech.net; <https://orcid.org/0009-0006-1526-991X>; ScopusAuthorID: 56315356200
- Ilya S. Steshin**³, postgraduate student, Research Engineer; ilyasteshinm@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0009-4241-3798>; ScopusAuthorID: Scopus ID: 59553039900
- ^{1, 2, 3} Volga State University of Technology; Lenina Sq., 3, Yoshkar-Ola, 424000, Mari El Republic, Russian Federation

Author Contribution

I.V. Petukhov – research supervision, methodology; L.A. Steshina – background analysis, investigation, technology development roadmap; I.S. Steshin – formal analysis, writing – review and editing of the manuscript.

Conflict of interests

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

Received 01.07.2025; Revised 13.01.2026; Accepted 15.01.2026

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.3: 621

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-1-36-43>

Использование нейронных сетей в технической эксплуатации самоходных машин

*Т.Е. Алушкин^{1✉}, М.Ю. Мещеряков², А.В. Старцев³*¹ Высшая инженерная школа агробиотехнологий «Агробиотек», Национальный исследовательский Томский государственный университет; г. Томск, Россия² Национальный исследовательский Томский политехнический университет; г. Томск, Россия,³ Южно-Уральский государственный аграрный университет; г. Челябинск, Россия¹ timofey.alushkin@gmail.com[✉]; <https://orcid.org/0000-0001-6418-2438>² justbegold@outlook.com; <https://orcid.org/0000-0002-3024-4554>³ SAV63.10.04@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0007-0271-6706>

Аннотация. Действительный ресурс двигателей тракторов тягового класса 1,4 в Томской области значительно ниже гарантийного и имеет большой разброс. Статистический анализ показал, что математическое ожидание наработки до первого капитального ремонта не превышает 7000 моточасов, среднеквадратичное отклонение – 1707 моточасов, коэффициент вариации – 0,24. Ресурс новых двигателей до первого капитального ремонта различается более чем в 2,8 раза. При прогнозировании причин выхода из строя двигателей по количественному показателю наработки в моточасах целесообразно использовать искусственные нейронные сети. Цель исследований – на основании данных долговечности двигателей тракторов тягового класса 1,4 в условиях рядовой эксплуатации обучить нейронную сеть, предсказывающую причину выхода из строя двигателя при известной наработке. Авторами предложена система интеллектуального анализа отказов двигателей на основе нейронной сети. Программный код написан на языке Python. В основе нейросети использовали модули PyTorch. Модуль Matplotlib применялся для создания графической части, NumPy – для работы с матрицами. Модуль sklearn использовался для нормализации входных данных. Искусственная нейронная сеть состоит из полносвязной сети, которая включает в себя один входной нейрон, скрытый слой из 10 нейронов и выходной слой из 4 нейронов. Модель обучалась на данных 25 двигателей типа 4Ч(Н) 11/12,5 производства Минского моторного завода и позволяет по входному параметру «Наработка в моточасах» выдавать вероятностное распределение по 4 целевым категориям неисправностей: кривошипно-шатунный механизм, система смазки, система питания, система охлаждения. Точность прогноза причины отказа двигателя 4Ч 11,0/12,5 в условиях рядовой эксплуатации в зависимости от его наработки составила 60%. В дальнейшем планируется дообучить искусственную нейронную сеть с использованием новых данных с приемлемой точностью прогноза 80%.

Ключевые слова: ресурс двигателей; наработка; отказ; искусственные нейронные сети; обучение нейронной сети; точность прогноза

Для цитирования: Алушкин Т.Е., Мещеряков М.Ю., Старцев А.В. Использование нейронных сетей в технической эксплуатации самоходных машин // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 1. С. 36-43. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-1-36-43>

ORIGINAL ARTICLE

Use of neural networks in the technical operation of self-propelled machinery

*T.E. Alushkin^{1✉}, M.Y. Meshcheryakov², A.V. Startsev³*¹ Higher Engineering School of Agrobiotechnology, National Research Tomsk State University; Tomsk, Russia² National Research Tomsk Polytechnic University; Tomsk, Russia³ South Ural State Agrarian University; Chelyabinsk, Russia¹ timofey.alushkin@gmail.com[✉]; <https://orcid.org/0000-0001-6418-2438>² justbegold@outlook.com; <https://orcid.org/0000-0002-3024-4554>³ SAV63.10.04@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0007-0271-6706>

Abstract. The actual service life of tractor engines of traction class 1.4 in the Tomsk region falls significantly short of the warranty period and exhibits high dispersion. Statistical analysis reveals that the mean operating time until

the first overhaul does not exceed 7,000 engine hours, with a standard deviation of 1,707 hours and a coefficient of variation of 0.24. The service life of new engines until the first overhaul varies by more than a factor of 2.8. To address the challenge of predicting failure modes based on cumulative operating time, this study employs artificial neural networks (ANNs). The research objective was to train an ANN to identify the most likely cause of engine failures using durability data collected under routine operating conditions of traction class 1.4 tractor engines. The authors developed an intelligent failure diagnostics system using Python and the PyTorch framework. The Matplotlib module was used for visualization, NumPy for matrix operations, and sklearn for input data normalization. The ANN uses a fully connected (dense) architecture consisting of an input layer (one neuron), a hidden layer (10 neurons), and an output layer (four neurons). The model was trained on a dataset from 25 Minsk Motor Plant engines (type 4Ch(N) 11/12.5). Based on the “operating time” input parameter, the model generates a probability distribution across four failure categories: the crank mechanism, the lubrication system, the fuel system, and the cooling system. Initial testing yielded a prediction accuracy of 60%. Future research will focus on fine-tuning the artificial neural network by expanding the training dataset to achieve a target accuracy of 80%.

Keywords: engine service life; operating time; failure; artificial neural networks; neural network training; prediction accuracy

For citation: Alushkin T.E., Meshcheryakov M.Y., Startsev A.V. Use of neural networks in the technical operation of self-propelled machinery. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(1):36-43 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-1-36-43>

Введение

Эксплуатация машинно-тракторного парка (МТП) в сельскохозяйственном производстве показывает низкие значения безотказности и долговечности техники [1], напрямую влияющих на ее фактическую производительность [2, 3].

Исследования авторов статьи подтверждают, что производительность МТП значительно зависит от уровня его технического состояния. Совместно с организационно-технологическими аспектами – такими, как качество труда, настройка оборудования и условия эксплуатации, их совокупное влияние составляет свыше 50% [4]. Согласно недавним опросам специалистов агропромышленного комплекса Томской области при техническом обслуживании и ремонте повсеместно применяются более дешевые неоригинальные запасные части. Это объясняется тем, что запасные части формируют до половины всех затрат на ремонт [5]. Политика минимизации издержек на восстановление техники ведет к нестабильности показателей ее надежности. Дополнительной проблемой является широкий модельный ряд техники в парках сельхозпредприятий. В результате совместного влияния этих факторов происходит снижение фактического ресурса МТП. Согласно исследованиям [5] после ремонта техника служит в среднем лишь 30...35% от установленного предприятием-изготовителем ресурса.

Долговечность двигателя определяется балансом множества факторов. Прогнозирование причин его выхода из строя по количественному показателю наработки в моточасах представляет собой

классическую задачу инженерного прогнозирования, находящуюся на стыке статистики, машинного обучения и предметной экспертизы. Нейронные сети, как универсальные аппроксиматоры нелинейных зависимостей, становятся ключевым инструментом для выявления скрытых закономерностей в этих данных, преобразуя показатели наработки в структурированную вероятностную оценку рисков.

Цель исследований: на основании данных долговечности двигателей тракторов тягового класса 1,4 в условиях рядовой эксплуатации обучить нейронную сеть предсказывать причину выхода из строя двигателя при известной наработке.

Материалы и методы

Методы исследований включали в себя сбор и анализ информации по долговечности двигателей тракторов тягового класса 1,4, собранных в условиях рядовой эксплуатации на предприятиях агропромышленного комплекса Томского и Кемеровского районов Томской области, выборка составила 25 случаев. Выявлялись причины выхода из строя двигателей, наработка при отказе до первого капитального ремонта, в случае неоднозначных данных проводился опрос операторов самоходных машин. Причины отказов описывались в текстовом виде в форме короткой формулировки – например, «Масляное голодание».

Собранная информация обрабатывалась в программе Statistica для получения закона распределения, математического ожидания наработки до отказа, до первого капитального ремонта, величины среднеквадратичного отклонения и пр.

Проведено ранжирование отказов по отличительным признакам на 5 групп. Затем, при обучении искусственной нейронной сети, система ранжирования была упрощена до 4 групп.

Наработка до первого капитального ремонта выполняла роль интегрального показателя долговечности, поскольку исследуемый парк тракторов эксплуатировался в различных условиях нагрузок, качества технического обслуживания и квалификации операторов.

Ключевым этапом являлась категоризация причин отказа, переводящая текстовые описания («Прорыв картерных газов», «Масляное голодание») в формальные, машиночитаемые классы. Эта процедура требует подробной верификации, так как от ее точности зависит сама возможность обучения. Полученная в итоге размеченная выборка становится фундаментом для обучения нейронной сети.

Входной слой принимает интегральный параметр – наработку в моточасах. Данные предварительно нормализуются, что позволяет сети работать не с абсолютными величинами, а с относительными отклонениями, ускоряя и стабилизируя процесс обучения.

Скрытый слой выполняет функцию интеллектуального ядра системы. Его нейроны, активируемые нелинейными функциями – такими, как ReLU, учатся распознавать сложные непрямолинейные паттерны в данных. Количество нейронов в этом слое подбирается эмпирически при стремлении найти баланс между способностью к обобщению и склонностью к запоминанию.

Выходной слой оформляет результат работы сети в пригодном для принятия решений виде. Соответствующие основным категориям отказов 4 нейрона используют функцию активации Softmax. Это превращает их raw-активации в вектор вероятностей, где значение каждого элемента интерпретируется как уверенность сети в том, что данная наработка с наибольшей вероятностью приведет к отказу именно по этой причине. Такое представление предлагает взвешенную оценку всех рисков.

Обученная модель должна быть проверена на данных, не используемых в обучении нейронной сети. Разделение исходной выборки на обучающую и валидационную подмножества позволяет объективно оценить способность сети к обобщению. Ключевыми метриками становятся точность (accuracy) – доля верных предсказаний, и матрица ошибок (confusion matrix), которая детально показывает, насколько часто модель путает одну категорию отказа с другой. Ввиду небольшого количества данных для исследований (25 случаев) все они были использованы для обучения нейронной сети.

Результаты и их обсуждение

Ресурс двигателей типа 4Ч(Н) 11/12,5 производства Минского моторного завода до первого капитального ремонта и основные причины их поступления на капитальный ремонт представлены в таблице 1. Нарботка учитывалась по показанию счетчиков моточасов, установленных в кабинах тракторов.

Отметим, что в таблице 1 не указаны события, связанные с ремонтом головки блока цилиндров. В условиях производства это не считается случаем наступления капитального ремонта.

Анализ данных показал, что ресурс новых двигателей до первого капитального ремонта может различаться более чем в 2,8 раза. Минимальная наработка до капитального ремонта составила 4010 моточасов, наибольшая – 11570 моточасов.

Выполнив группировку всех представленных причин, можно заключить, что подавляющее большинство отказов связано с кривошипно-шатунным механизмом двигателя – 15 случаев. Далее следуют причины, связанные с системой смазки, – 4 случая. Нарушениями в работе центробежного регулятора обусловлены 3 случая, произошедшие, по-видимому, внезапно во время проведения транспортных работ. Два случая вызваны неисправностями в работе системы охлаждения на работах, связанных с высокими нагрузками (например, зяблевая обработка почвы). Один случай связан с быстрой деградацией масла и фактической закупоркой всех масляных магистралей в двигателе, что напрямую указывает на качество моторного масла, применяемого в двигателе.

Подавляющее большинство случаев поступления двигателя на капитальный ремонт, с обязательной полной разборкой и дефектовкой, связано с кривошипно-шатунным механизмом двигателя – 60% всех случаев (рис. 1).

Вторая группа причин также связана со значительным износом, однако в половине случаев речь идет о так называемом «потении» двигателя, то есть значительная потеря масла происходит через различные подвижные и неподвижные уплотнения, устранить которые без полной разборки двигателя не представляется возможным. Добавим, что случай, связанный с нарушением фильтрации масла, объясняется, по-видимому, неправильной сборкой центробежного фильтра.

Следующая группа причин связана с неисправностями в работе системы охлаждения – 8%. Поступление в ремонт вызвано сочетанием неисправности системы охлаждения, характера выполняемых работ (высокая степень загрузки двигателя) и, по-видимому, человеческого фактора.

Таблица 1

Наработка тракторных двигателей типа 4Ч(Н) 11/12,5 до первого капитального ремонта, причины поступления в ремонт

Table 1

Operating time of tractor engines of type 4Ch(N) 11/12.5 until the first overhaul and reasons for repair

Наработка до первого капитального ремонта, моточасы	Краткое описание причины ремонта
4010	Некачественное (контрафактное) моторное масло
5580	Повышенный угар масла
6970	Ускоренный износ по причине нарушения фильтрации масла
6440	Масляное голодание
8680	Нарушение герметичности системы смазки
5960	Стук в работе
5870	Перегрев двигателя
11100	Потеря мощности и экономичности
7940	Нарушение герметичности системы смазки
6050	Прорыв картерных газов
7410	Повышенный угар масла
5820	Выход из строя по причине повышенных центробежных нагрузок
6190	Повышенный угар масла
6140	Износ ЦПГ
7920	Потеря мощности и экономичности
5420	Выход из строя ввиду повышенных центробежных нагрузок
7380	Прорыв картерных газов
7560	Нарушение герметичности системы смазки
11570	Потеря мощности и экономичности
6530	Износ ЦПГ
7570	Прорыв картерных газов
7580	Выход из строя по причине повышенных центробежных нагрузок
7340	Повышенный угар масла
6940	Прорыв картерных газов
4500	Перегрев двигателя



Рис. 1. Выявленные случаи отказа двигателей, % от общего числа событий

Fig. 1. Identified cases of engine failures as a percentage of the total number of events

Статистический анализ долговечности двигателей сельскохозяйственных тракторов в условиях рядовой эксплуатации показал, что математическое ожидание наработки до первого капитального ремонта не превышает 7000 моточасов, среднеквадратичное отклонение составляет 1707 моточасов, коэффициент вариации – 0,24. Полученные данные позволяют утверждать недоиспользование ресурса, гарантированного предприятием-изготовителем, на 12,5%.

Следует отметить, что инженерные службы современных аграрных предприятий, будучи перегруженными смежными задачами, зачастую не имеют возможности осуществлять полноценный учет и анализ отказов машинно-тракторного парка. Применение вероятностных методов демонстрирует достаточную точность лишь на крупных выборках, которые обеспечивают необходимую достоверность. При работе с данными по технике одной модели требуется проверка гипотезы об их принадлежности одной генеральной совокупности, а также анализ расхождений между математическими ожиданиями наработки на отказ и их стандартными отклонениями. Высокие коэффициенты вариации, характерные для узлов тракторов, свидетельствуют о неравномерности функции распределения отказов [6, 7]. Это ставит под сомнение адекватность применения стандартного аппарата теории вероятностей для решения задач технической эксплуатации машинно-тракторных агрегатов, поскольку требуются большая выборка данных и схожие условия как для технической, так и для производственной эксплуатации машин. Как вариант решения данной проблемы, в статье [8] предлагается выбор стратегии обслуживания для парка техники.

Повысить эффективность учета и анализа показателей безотказности и долговечности машинно-тракторного парка можно за счет внедрения специализированных информационных систем, интегрирующих данные от бортовых систем диагностирования. Для отдельных видов агрегатов подобные решения уже успешно применяются¹, однако получаемая диагностическая информация зачастую остается децентрализованной и не проходит систематическую аналитическую обработку.

Внедрение комплексной системы сбора и интерпретации диагностических данных открывает

значительные резервы для оптимизации производственных процессов. Положительные результаты подобных внедрений отмечены в сфере растениеводства [9, 10]. В частности, исследование [9] демонстрирует достижение таких количественных показателей: продолжительность посевных работ сократилась в 1,7 раза, уборочных – в 2,3 раза, а суточная производительность при выполнении защитных мероприятий возросла более чем в 2 раза.

Изучая вопрос создания системы для учета, интерпретации и корректировки данных о техническом состоянии МТП, авторы статьи пришли к выводу о том, что такая система соответствует концепции искусственной нейронной сети (ИНС). Использование ИНС позволит выявлять и прогнозировать отклонения диагностических параметров агрегатов и систем от допустимых значений, а также корректировать эти значения на основе индивидуальных данных. Перспективность данного подхода подтверждается исследованиями [11, 12].

Авторами настоящих исследований разработана система интеллектуального анализа отказов двигателей на основе нейронной сети. Написан код для программирования на языке Python. В качестве основы нейросети использованы модули PyTorch; Matplotlib применялся для создания графической части, NumPy – для работы с матрицами; sklearn использовался для нормализации входных данных.

Модель обучалась на исторических данных (25 реальных кейсов) и позволяет по входному параметру «Наработка в моточасах» выдавать вероятностное распределение по 4 целевым категориям неисправностей: 1 – кривошипно-шатунный механизм; 2 – система смазки; 3 – система питания; 4 – система охлаждения. Была создана многоклассовая классификация на основе единственного числового признака.

В итоге ИНС имела архитектуру, состоящую из полносвязной сети, которая включает в себя один входной нейрон, скрытый слой из 10 нейронов и выходной слой из 4 нейронов. Обучение ИНС проводилось с использованием CrossEntropyLoss, была предусмотрена возможность дополнительного обучения на новых данных, сохранения (загрузки) модели, построения графиков обучения.

По результатам моделирования получены графики зависимости функции потерь и точности от числа эпох (рис. 2).

Для обучения ИНС было заложено 500 эпох. Из анализа полученных графиков (рис. 2) следует, что результат перестает улучшаться после

¹ Методические положения по диагностике двигателей внутреннего сгорания энергонасыщенной техники динамическим методом / В.В. Альт, С.Н. Ольшевский, О.Ф. Савченко, О.В. Елкин, И.П. Добролюбов, Д.Н. Клименко, А.К. Орехов, А.А. Борисов. Новосибирск: СФНЦА РАН, 2017. 56 с.

100...200 эпох. Это связано с малым количеством данных. При этом ошибка снизилась и уменьшился ее разброс.

В итоге обучения ИНС получили данные, показывающие результаты классификации обучающих данных (рис. 3). В первом столбце указана наработка, во втором – описание причины отказа, затем – число истинных событий, связанных с данным отказом, далее – число предсказанных ИНС. Если значения в столбцах 3 и 4 не совпадали, это считалось ошибкой.

На представленных обучающих данных получена итоговая точность прогноза ИНС в 60%. Предложенная методология представляет собой не просто технический регламент по настройке нейронной сети, а целостный подход к созданию системы поддержки инженерных решений. От сбора осмысленных данных через проектирование прозрачной архитектуры к строгому обучению и всесторонней валидации каждый этап направлен на формирование надежного, интерпретируемого и практически полезного инструмента.

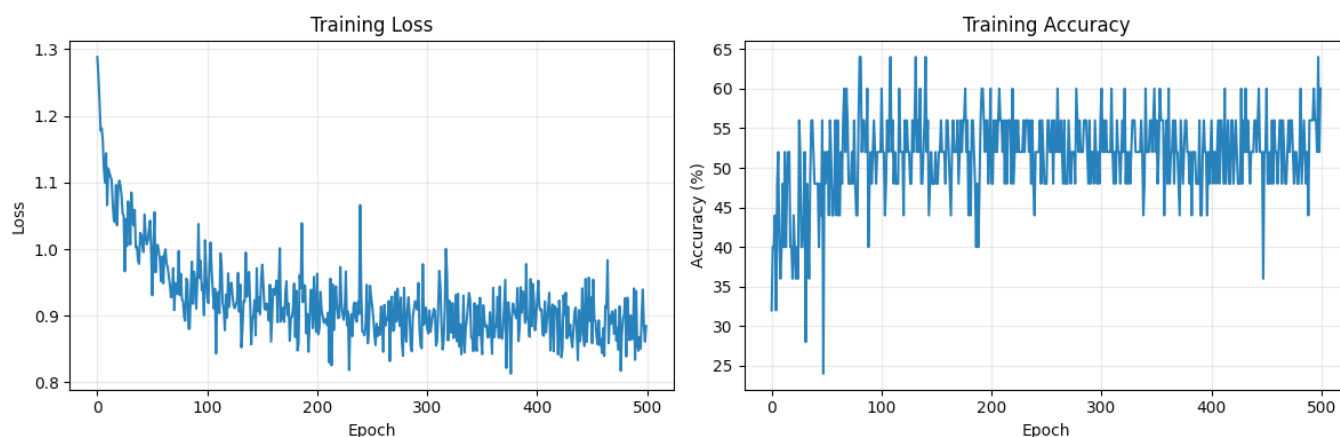


Рис. 2. Зависимость функции потерь и точности от количества эпох

Fig. 2. Dependency of the loss function and accuracy on the number of epochs

=====

РЕЗУЛЬТАТЫ КЛАССИФИКАЦИИ НА ОБУЧАЮЩИХ ДАННЫХ

=====

Наработка	Описание	Истинная	Предсказ.	Совпадение
4010	Некачественное (контрафактное) моторное масло	2	2	✓
5580	Повышенный угар масла	2	2	✓
6970	Ускоренный износ из-за нарушения фильтрации масл	2	1	✗
6440	Масляное голодание	2	1	✗
8680	Нарушение герметичности системы смазки	2	2	✓
5960	Стук в работе	1	1	✓
5870	Перегрев двигателя	4	2	✗
11100	Потеря мощности и экономичности	3	3	✓
7940	Нарушение герметичности системы смазки	2	2	✓
6050	Прорыв картерных газов	2	1	✗
7410	Повышенный угар масла	2	1	✗
5820	Выход из строя из-за повышенных центробежных наг	3	2	✗
6190	Повышенный угар масла	1	1	✓
6140	Износ ЦПГ	1	1	✓
7920	Потеря мощности и экономичности	3	2	✗
5420	Выход из строя из-за повышенных центробежных наг	3	2	✗
7380	Прорыв картерных газов	1	1	✓
7560	Нарушение герметичности системы смазки	2	2	✓
11570	Потеря мощности и экономичности	3	3	✓
6530	Износ ЦПГ	1	1	✓
7570	Прорыв картерных газов	1	2	✗
7580	Выход из строя из-за повышенных центробежных наг	3	2	✗
7340	Повышенный угар масла	1	1	✓
6940	Прорыв картерных газов	1	1	✓
4500	Перегрев двигателя	4	4	✓

Рис. 3. Таблица результатов классификации на обучающих данных

Fig. 3. Table of classification results on the training data

В итоге получена система, которая поможет специалисту-практику с определенной долей вероятности спрогнозировать причину отказа двигателя.

Выводы

1. Реальный ресурс двигателей тракторов тягового класса 1,4 в Томской области значительно ниже гарантийного и имеет большой разброс. Статистический анализ показал, что математическое ожидание наработки до первого капитального ремонта не превышает 7000 моточасов, среднеквадратичное отклонение составляет 1707 моточасов, коэффициент вариации – 0,24. Ресурс новых двигателей

до первого капитального ремонта различается более чем в 2,8 раза.

2. По результатам полученных данных обучена искусственная нейронная сеть на языке программирования Python с набором необходимых дополнительных модулей. ИНС состоит из полносвязной сети, которая включает в себя один входной нейрон, скрытый слой из 10 нейронов и выходной слой из 4 нейронов. Точность прогноза причины отказа двигателя 44,1/12,5 в условиях рядовой эксплуатации в зависимости от его наработки составила 60%. В дальнейшем планируется дообучить ИНС с использованием новых данных с приемлемой точностью прогноза (80%).

Список источников

1. Докин Б.Д. Эффективное использование сельскохозяйственной техники при производстве зерна в Сибири // Техника и оборудование для села. 2009. № 8. С. 7-11. EDN: KWRIFR
2. Шуханов С.Н., Кузьмин А.В., Болоев П.А. Надежность работы машинно-тракторного агрегата // Инженерные технологии и системы. 2020. № 1, Т. 30. С. 8-20. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202001.008-020>
3. Пирожков Д.Н., Беляев В.И., Завора В.А. Основы теоретического обоснования технического оснащения растениеводства аграрного предприятия // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2016. № 3 (137). С. 166-169. EDN: VSSMYV
4. Старцев А.В., Алушкин Т.Е., Романов С.В., Сторожев И.И. Модель определения эксплуатационных затрат машинно-тракторных агрегатов на посев с учетом продолжительности работ и размеров площадей // Тракторы и сельхозмашины. 2020. № 1. С. 82-87. EDN: SIMAWN
5. Соловьев Р.Ю., Горячев С.А. Ресурсосбережение при техническом сервисе сельскохозяйственной техники // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2013. № 2. С. 37-49. EDN: PYYRAT
6. Karagodin V.I., Khapugin R.A. Rationale and frequency of the diagnosis of component parts of tractors Belarus in the development of technology maintenance. *IOP Conference Series. Materials Science and Engineering*. 2020;832(1):1-8. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/832/1/012005>
7. Иванов В.В., Доценко С.А., Седов А.В., Николаев А.П. Надежность систем и агрегатов тракторов семейства МТЗ и распределение отказов по интервалам наработки // Пермский аграрный вестник. 2017. № 4 (20). С. 30-35. EDN: ZXHGIZ
8. Pourdarbani R. Choosing a proper maintenance and repair strategy for tractors (in Urmia). *Acta Technologica Agriculturae*. 2019;22(1):12-16. <https://doi.org/10.2478/ata-2019-0003>
9. Альт В.В., Чекусов М.С., Исакова С.П. Цифровые технологии в растениеводстве // Технические культуры: Научный сельскохозяйственный журнал. 2023. Т. 3, № 2. С. 46-53. EDN: QEUMHR
10. Альт В.В., Ольшевский С.Н. Информационные технологии в инновационном развитии АПК // Достижения науки и техники АПК. 2016. Т. 30, № 4. С. 67-69. EDN: VZYEZF
11. Шимохин А.В. Методика определения оптимальных сроков ремонта транспорта с использованием технологии

References

1. Dokin B.D. The efficient application of agricultural machinery in grain production in Siberia. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2009;8:7-11. (In Russ.)
2. Shukhanov S.N., Kuzmin A.V., Boloyev P.A. Reliability of Machine-Tractor Aggregates Operation. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy = Engineering Technologies and Systems*. 2020;30(1):8-20. (In Russ.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202001.008-020>
3. Pirozhkov D.N., Beljaev V.I., Zavora V.A. The fundamentals of theoretical substantiation of technical equipment of crop production at an agricultural enterprise. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2016;3:166-169. (In Russ.)
4. Starcev A.V., T.E., Alushkin S.V. Romanov, Storozhev I.I. A model for determining the operating costs of machine-tractor units for sowing, taking into account the duration of work and the size of the area. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2020;1:82-87. (In Russ.)
5. Soloviev R.Yu. Goryachev, S.A. Resource saving in the maintenance of agricultural machinery. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2013;2:37-49. (In Russ.)
6. Karagodin V.I., Khapugin R.A. Rationale and frequency of the diagnosis of component parts of tractors Belarus in the development of technology maintenance. *IOP Conference Series. Materials Science and Engineering*. 2020;832(1):1-8. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/832/1/012005>
7. Ivanov V.V., Dotsenko S.A., Sedov A.V., Nikolaev A.P. The reliability of systems and components for tractors MTZ of the family and the distribution of failure intervals, developments. *Perm Agrarian Journal*. 2017;4(20):30-35. (In Russ.)
8. Pourdarbani R. Choosing a proper maintenance and repair strategy for tractors (in Urmia). *Acta Technologica Agriculturae*. 2019;22(1):12-16. <https://doi.org/10.2478/ata-2019-0003>
9. Alt V.V., Chekusov M.S., Isakova S.P. Digital technologies in crop production. *Technical Crops. Scientific Agricultural Journal*. 2023;3(2):46-53. (In Russ.)
10. Alt V.V., Olshevskiy S.N. Information technologies in the innovation development of agro-industrial complex. *Achievements of Science and Technology in Agro-Industrial Complex*. 2016;30(4):67-69. (In Russ.)
11. Shimokhin A.V. Methodology for determining the optimal terms of transport repair using neural network technology. *Vestnik Omskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2023;2(50):153-160. (In Russ.)

нейронных сетей // Вестник Омского государственного аграрного университета. 2023. № 2 (50). С. 153-160. EDN: YYOPXG
 12. Шимохин А.В., Кирасиров О.М. Механизм совершенствования управления процессом технического обслуживания и ремонта с применением нейросетевой технологии // Тракторы и сельхозмашины. 2023. Т. 90, № 6. С. 561-573. EDN: QXKZZX

Информация об авторах

Алушкин Тимофей Евгеньевич, канд. техн. наук, доцент;
 Национальный исследовательский
 Томский государственный университет,
 Высшая инженерная школа агробiotехнологий,
 кафедра инновационных технологий в АПК; 634050,
 Российская Федерация, г. Томск, пр. Ленина, 36;
timofey.alushkin@gmail.com[✉];
<https://orcid.org/0000-0001-6418-2438>; SPIN-код: 1296-9519

Мещеряков Михаил Юрьевич, Национальный
 исследовательский Томский политехнический
 университет, Школа новых производственных
 технологий; 634050, Российская Федерация, г. Томск,
 пр. Ленина, 30; justbegold@outlook.com;
<https://orcid.org/0000-0002-3024-4554>; SPIN-код: 6386-1339

Старцев Андрей Васильевич, д-р техн. наук, профессор;
 Южно-Уральский государственный
 аграрный университет, кафедра тракторов,
 сельскохозяйственных машин и земледелия;
 454080, Российская Федерация, г. Челябинск,
 пр. Ленина, 75; SAV63.10.04@mail.ru;
<https://orcid.org/0009-0007-0271-6706>; SPIN-код: 9683-6993

Вклад авторов

Т.Е. Алушкин – проведение исследований, верификация данных, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;

М.Ю. Мещеряков – реализация компьютерного кода и вспомогательных алгоритмов;

А.В. Старцев – руководство исследованиями, методология.

Конфликт интересов

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

Статья поступила 24.09.2025, после рецензирования и доработки 30.12.2025; принята к публикации 12.01.2026

12. Shimokhin A.V., Kirasirov O.M. The procedure for improving the management of the maintenance and repair process using the neural network technology. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2023;90(6):561-573. (In Russ.)

Author Information

Timofey E. Alushkin, PhD (Eng), Associate Professor;
 National Research Tomsk State University,
 Higher Engineering School of Agrobiotechnologies,
 Department of Innovative Technologies
 in the Agribusiness Sector; 36 Lenin Ave., Tomsk, 634050,
 Russian Federation; timofey.alushkin@gmail.com[✉];
<https://orcid.org/0000-0001-6418-2438>;
 SPIN-code: 1296-9519

Mikhail Yu. Meshcheryakov, National Research Tomsk
 Polytechnic University, School of Advanced Manufacturing
 Technologies; 30 Lenin Ave., Tomsk, 634050,
 Russian Federation; justbegold@outlook.com;
<https://orcid.org/0000-0002-3024-4554>;
 SPIN-code: 6386-1339

Andrey V. Startsev, DSc (Eng), Professor;
 South Ural State Agrarian University,
 Department of Tractors, Agricultural Machines,
 and Soil Management; 75 Lenin Ave., Chelyabinsk,
 454080, Russian Federation; SAV63.10.04@mail.ru;
<https://orcid.org/0009-0007-0271-6706>;
 SPIN-code: 9683-6993

Author Contribution

T.E. Alushkin – investigation, data verification, writing – manuscript review and editing.

M.Yu. Meshcheryakov – software.

A.V. Startsev – research supervision, methodology.

Conflict of interests

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

Received 24.09.2025; Revised 30.12.2025; Accepted 12.01.2026

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.331

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-1-44-53>**Анализ размерных характеристик семян кукурузы и подсолнечника****А.Ю. Несмиян^{1✉}, А.Г. Арженовский², В.И. Хижняк³, К.П. Дубина⁴**^{1,3,4} Азово-Черноморский инженерный институт – филиал Донского государственного аграрного университета в г. Зернограде; г. Зерноград, Ростовская область, Россия² Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия¹ nesmiyan.andrei@yandex.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-5556-1767>² argenowski@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3569-8934>³ hignyk@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0002-6913-9345>⁴ longonor@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0543-9306>

Аннотация. Качество работы сельскохозяйственных машин, задействованных при производстве пропашных культур, из которых наиболее востребованными являются подсолнечник и кукуруза, зависит от соответствия параметров и режимов их работы размерным характеристикам обрабатываемого материала включая размеры зерновок (семян). В связи с этим целью исследований являлся анализ размерных характеристик семян современных гибридов (сортов) подсолнечника и кукурузы. Исследования проводили путем измерения основных размеров семян 12 гибридов кукурузы и 7 сортов (гибридов) подсолнечника, рекомендованных к использованию в Центрально-Черноземном и Северо-Кавказском регионах РФ, с последующей статистической обработкой полученных данных в программе *Microsoft Excel*. В результате исследований установлено, что для зерновок кукурузы характерны следующие усредненные размеры: длина – 11 мм; ширина – 8,4 мм; толщина – 5,1 мм. Между гибридами вариативность средних значений основных размеров семян изменяется в диапазоне 8,1...9,7%. При этом корреляционные связи между длиной и шириной, а также между шириной и толщиной практически отсутствуют, между длиной и толщиной семян наблюдается обратная корреляция. Исследуемые семена подсолнечника характеризуются следующими усредненными размерами: длина – 11,7 мм; ширина – 6,1 мм; толщина – 3,8 мм. Для всех основных размеров семян подсолнечника наблюдается прямая корреляция. С определенными допущениями при моделировании рабочих процессов сельскохозяйственных машин семена кукурузы могут быть представлены в виде эллипсоидов вращения с осью, соответствующей их толщине, а семена подсолнечника – с осью, соответствующей их длине. Полученные размерные характеристики семян пропашных культур могут быть использованы при подборе рациональных параметров решет сеяночистительных, калибровочных машин и триерных цилиндров, при подборе диаметров дозирующих элементов аппаратов точного высева.

Ключевые слова: размерные характеристики семян; анализ размерных характеристик семян; семена; семена кукурузы; семена подсолнечника; кукуруза; подсолнечник

Финансирование. Материалы статьи опубликованы в рамках научного исследования 023032400391-4-2.3.1, осуществляемого за счет средств федерального бюджета.

Для цитирования: Несмиян А.Ю., Арженовский А.Г., Хижняк В.И., Дубина К.П. Анализ размерных характеристик семян кукурузы и подсолнечника // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 1. С. 44-53. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-1-44-53>

ORIGINAL ARTICLE

Analysis of dimensional characteristics of maize and sunflower seeds

A.Yu. Nesmiyan¹, A.G. Arzhenovskiy², V.I. Khizhnyak³, K.P. Dubina⁴^{1,3,4} Azov-Black Sea Engineering Institute – Branch of Don State Agrarian University in Zernograd; Zernograd, Rostov Region, Russia² Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia¹ nesmiyan.andrei@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5556-1767>² argenowski@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3569-8934>³ hignyk@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0002-6913-9345>⁴ longonor@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0543-9306>

Abstract. The efficiency of agricultural machinery used in the cultivation of row crops – most notably sunflower and maize – depends significantly on how well the operating parameters match the physical and dimensional characteristics of the seeds. This study aims to analyze the dimensional properties of seeds from modern sunflower and maize hybrids (varieties). The research involved measuring the primary dimensions of twelve maize hybrids and seven sunflower varieties/hybrids recommended for the Central Black Earth and North Caucasus regions of the Russian Federation, followed by statistical analysis. The findings indicate that maize seeds have average dimensions of 11.0 mm (length), 8.4 mm (width), and 5.1 mm (thickness), with inter-hybrid variability ranging between 8.1% and 9.7%. Correlation analysis revealed no significant relationship between length and width or width and thickness; however, an inverse correlation was observed between seed length and thickness. Sunflower seeds exhibited average dimensions of 11.7 mm, 6.1 mm, and 3.8 mm for length, width, and thickness, respectively, showing a direct correlation across all primary dimensions. For process modeling purposes, maize seeds can be approximated as ellipsoids of revolution with the axis of rotation corresponding to thickness, while sunflower seeds are best represented as ellipsoids rotating about their longitudinal axis. These dimensional characteristics are applicable for selecting rational parameters of seed-cleaning screens, grading machinery, indent cylinders, and the diameters of metering elements in precision seeders.

Keywords: seed dimensional characteristics; analysis of seed dimensional characteristics; seeds; maize seeds; sunflower seeds; maize; sunflower

Funding: The research was carried out under project No. 023032400391-4-2.3.1 and supported by Federal budget funding.

For citation: Nesmiyan A.Yu., Arzhenovskiy A.G., Khizhnyak V.I., Dubina K.P. Analysis of dimensional characteristics of maize and sunflower seeds. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(1):44-53 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-1-44-53>

Введение

Качество работы посевных, уборочных, очистных, калибровочных и других сельскохозяйственных машин зависит от соответствия их конструктивных и технологических параметров, а также режимов работы физико-механическим свойствам обрабатываемого материала [1, 2, 3] включая размерные характеристики семян (зерновок) [4, 5].

В общем спектре сельскохозяйственных культур, возделываемых в Российской Федерации, значительное место занимают пропашные, являющиеся ценным источником продовольствия, корма и промышленного сырья. Пропашные культуры выделяются среди прочих технологией возделывания, предполагающей наличие широких междурядий для обработки почвы («пропахивание») в течение длительного времени после появления всходов [6-8]. С 2020 по 2024 гг. в структуре российских посевных площадей на пропашные (кукуруза, сахарная

свекла, подсолнечник, картофель, овощные и бахчевые культуры) приходилось 19,3...20,8%, то есть от 15,4 до 17,1 млн га, из которых более 80% занимали подсолнечник и кукуруза¹. В научной литературе достаточно подробно рассмотрены физико-механические характеристики семян кукурузы [9, 10] и подсолнечника [11]. Однако следует учитывать, что изыскания в данном направлении фактически не могут быть исчерпаны, поскольку свойства семян сельскохозяйственных культур варьируются не только в зависимости от сорта или гибрида, которые постоянно развиваются и меняются, но и от множества других условий, в том числе от почвенных и агроклиматических условий возделывания соответствующих растений.

¹ Федеральная служба государственной статистики. [Электронный ресурс]. URL: <https://rosstat.gov.ru/search?q=посевные+площади> (дата обращения: 21.09.2025).

Цель исследований: анализ размерных характеристик семян современных гибридов (сортов) подсолнечника и кукурузы.

Материалы и методы

Измерение основных линейных размеров семян (длины, ширины и толщины) проводили с 2011 по 2024 гг. с использованием цифрового электронного штангенциркуля, обеспечивающего точность измерений до 0,01 мм. В исследованиях рассматривали семена 12 гибридов кукурузы^{2,3,4} и 7 сортов (гибридов) подсолнечника^{5,6,7,8}, рекомендованных к использованию в Центрально-Черноземном и (или) Северо-Кавказском регионах Российской Федерации [12, 13] (табл. 1).

Семена для измерений отбирали из общего массива в соответствии с ГОСТ 13586.3-2015 «Зерно.

Правила приемки и методы отбора проб». От каждого сорта (гибрида) исследовали по 250 семян.

Отметим, что исследование размеров семян гибрида кукурузы Зерноградский 282 МВ проводили трижды (на семенах урожая 2012, 2014 и 2024 гг.), а гибрида Зерноградский 354 МВ – по двум годам (2019 и 2024 гг.), что позволяет выполнять сравнение основных размеров семян не только по сортам (гибридам), но и по годам в рамках одного гибрида.

При обработке результатов измерений с помощью встроенных функций *Microsoft Excel* определяли минимальные, средние и максимальные значения основных размерных характеристик (a – длина семян, b – ширина семян, c – толщина семян) каждого сорта (гибрида), их отношения (a/b , a/c и b/c), среднеквадратические отклонения (σ_a , σ_b и σ_c) и коэффициенты корреляции (r_{ab} , r_{bc} и r_{ac})⁹.

Таблица 1

Исследуемые сорта (гибриды) кукурузы и подсолнечника

Table 1

Corn and sunflower varieties (hybrids) under study

Оригинатор	Сорт (гибрид)
Кукуруза	
ФГБНУ «АНЦ «Донской» (г. Зерноград, Ростовская область)	Зерноградский 282 МВ, Зерноградский 288 МВ, Зерноградский 330 МВ, Зерноградский 401 АМВ
ФГБНУ «Всероссийский НИИ кукурузы» (г. Пятигорск, Ставропольский край)	Риф МВ, РИК340МВ
ФГБНУ «АНЦ «Донской»» совместно с ФГБНУ «ВНИИ кукурузы»	Зерноградский 354 МВ
Saatbau Linz Egen (EC)	Космино, Альбирео, Контенто
НПО «Семеноводство Кубани» (Усть-Лабинский р-н, Краснодарский край)	Ладожский 292 АМВ
Hungaroseed, Будапешт, Венгрия	GS240
Подсолнечник	
ФГБНУ «Федеральный научный центр «Всероссийский НИИ масличных культур имени В.С. Пустовойта»» (г. Краснодар)	СПК Кондитерский, Мастер, Альбатрос, Лакомка, Флагман
Pioneer® Seeds	П 64 ЛЕ 136, П 64 ЛП 130

² Реестр достижений. [Электронный ресурс]. URL: <https://gossortrf.ru/registry/gosudarstvennyy-reestr-selektionnykh-dostizheniy-dopushchennykh-k-ispolzovaniyu-tom-1-sorta-rasteni/> (дата обращения: 21.09.2021).

³ Производство семян. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.progressagro.com/business/seed-growing/> (дата обращения: 17.09.2021).

⁴ Семена SAATBAU: Отличные семена – отличный урожай. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.saatbau.com/ru/> (дата обращения: 17.09.2021).

⁵ Сорта подсолнечника. [Электронный ресурс]. URL: <https://vniimk.ru/production/sorta-podsolnechnika/> (дата обращения: 17.09.2021).

⁶ Подсолнечник Альбатрос. [Электронный ресурс]. URL: <https://semnaopt.com/Подсолнечник/Альбатрос/601209/> (дата обращения: 17.09.2021).

⁷ Флагман. [Электронный ресурс]. URL: <https://ag-rus.ru/flagman> (дата обращения: 17.09.2021).

⁸ Пионер семена: сайт [Электронный ресурс]. URL: <https://agroskill.ru/catalog/vendor/pioneer/?ysclid=mgjpw9xzdv281434116> (дата обращения: 17.09.2021).

⁹ Файнштейн А.С., Логунова О.С., Ильина Е.А., Филиппов Е.Г. Введение в математическую статистику: Учебное пособие. Магнитогорск: Магнитогорский ГТУ им. Г.И. Носова, 2020. 47 с. EDN: YGRZCV.

Коэффициент вариации (V_x , %) размеров семян определяли по формуле:

$$V_x = 100 \frac{\sigma_x}{x_{cp}}, \quad (1)$$

абсолютную ошибку (m_x , мм) измерений – по выражению:

$$m_x = \frac{\sigma_x}{\sqrt{n_x}}, \quad (2)$$

где n_x – количество измерений соответствующего размера семян, шт.

Для оценки существенности корреляционных взаимосвязей исследуемых размеров семян применили показатель основного отклонения коэффициента корреляции:

$$\sigma_{rx} = \frac{1 - r_x^2}{\sqrt{n_x}}. \quad (3)$$

Если $|r_x| > 3 \sigma_{rx}$, то можно считать, что между значениями рассматриваемых пар размеров действительно существует связь; если $|r_x| \leq \sigma_{rx}$, то наличие связи является сомнительным. В промежуточных случаях взаимосвязь рассматриваемых величин неочевидна, и для ее оценки нужны дополнительные измерения¹⁰.

Результаты и их обсуждение

Значения основных линейных размеров исследованных семян представлены в таблице 2.

Анализируя данные таблицы 2, можно заключить следующее.

1. Из рассмотренных семян кукурузы наиболее крупными являются семена гибрида Зерноградский 288МВ, в первую очередь – за счет относительно больших значений ширины и толщины; наименьшие размеры – у семян гибридов Зерноградский 401АМВ и Зерноградский 330МВ. У подсолнечника наибольшим размером отличались семена сорта СПК Кондистерский, наименьшим – семена гибрида П 64 ЛП 130 компании Pioneer.

2. Средние размеры семян для исследуемых гибридов кукурузы варьируются по длине от 9,8 до 12,5 мм, по ширине – от 7,2 до 10,1 мм, по толщине – от 4,4 до 5,9 мм; длина семян подсолнечника изменяется от 9,9 до 14,8 мм, ширина – от 4,9 до 7,9 мм, толщина – от 3,3 до 4,6 мм.

3. Среднее отношение максимального значения размера семени к его минимальному значению для

кукурузы составляет: 1,5 по длине; 1,6 по ширине; 2,0 по толщине. Для подсолнечника это отношение составляет: 1,6 по длине; 2,2 по ширине; 2,3 по толщине. В большинстве случаев чем больше среднее значение исследуемого размера семени, тем меньше отношение между максимальным и минимальным его значениями.

4. При усредненных расчетах, в которых не предполагается учет фракции высеваемых семян, можно принимать размеры кукурузы такими: длина – 11,0 мм, ширина – 8,4 мм, толщина – 5,1 мм; для подсолнечника: длина – 11,7 мм, ширина – 6,1 мм, толщина – 3,8 мм.

5. Для сравниваемых сортов кукурузы вариативность размеров семян относительно невелика: они изменяются в диапазоне 6,3...11,9%. Для подсолнечника вариативность размеров семян больше и варьируется от 9,9 до 24,9%, что может объясняться меньшим количеством рассматриваемых сортов (гибридов).

6. Среднее квадратическое отклонение размеров семян гибрида Зерноградский 282 МВ по годам (0,7 мм по длине; 0,5 мм по ширине; 0,5 мм по толщине) меньше аналогичного показателя для массива всех исследуемых гибридов несмотря на разность объема выборок и обусловлено тем, что в 2024 г. семена гибрида Зерноградский 282 МВ измерялись отдельно по фракциям. Это позволяет говорить об определенном постоянстве размеров семян в рамках одного сорта (гибрида).

В таблице 3 представлены характеристики вариативности размеров семян исследуемых сортов кукурузы и подсолнечника.

Из данных таблицы 3 можно сделать следующие выводы:

1. Для кукурузы среднее квадратическое отклонение размеров семян, составившее в среднем 0,6...0,7 мм, фактически не зависит от их среднего значения.

2. Для подсолнечника наблюдается прямая корреляция: чем больше средний размер, тем больше значение среднее квадратическое отклонения.

3. Максимальное значение абсолютной ошибки измерений для подсолнечника – $m_{a\max} \approx 0,09$ мм, для кукурузы – $m_{c\max} \approx 0,06$ мм, поэтому линейные размеры семян (табл. 3) и значения среднее квадратическое отклонения (табл. 4) фиксировались с точностью до 1/10 мм, хотя приборная база позволяла замерять с точностью до 1/100 мм.

С точки зрения теоретического моделирования процессов сельскохозяйственных машин [14, 15] определенный интерес представляет информация об отношении и корреляции основных размеров семян (табл. 4).

¹⁰ Файнштейн А.С., Логунова О.С., Ильина Е.А., Филиппов Е.Г. Введение в математическую статистику: Учебное пособие. Магнитогорск: Магнитогорский ГТУ им. Г.И. Носова, 2020. 47 с. EDN: YGRZCV.

Таблица 2

Основные размеры исследуемых семян, мм

Table 2

Main dimensions of the seeds under study, mm

Гибрид, год сбора урожая		Минимальные размеры семян			Средние размеры семян			Максимальные размеры семян		
		a_{min}	b_{min}	c_{min}	a_{cp}	b_{cp}	c_{cp}	a_{max}	b_{max}	c_{max}
Кукуруза										
Зерноградский 282 МВ	2012	8,2	5,8	3,43	10,1	7,7	5,0	12,7	9,4	7,4
Зерноградский 282 МВ	2014	9,0	6,2	3,0	11,4	7,7	4,7	13,3	9,4	7,4
Зерноградский 282 МВ*	2024	7,4	5,8	4,0	10,0	7,8	5,9	12,5	9,5	7,6
Зерноградский 282 МВ**	2024	9,1	6,8	3,5	11,6	8,8	5,6	14,1	11,1	7,5
Зерноградский 288 МВ	2019	9,4	7,2	3,8	12,0	9,2	5,8	14,5	11,3	7,8
Зерноградский 330 МВ	2014	8,3	6,1	3,1	10,3	7,3	4,5	11,9	8,9	7,5
Зерноградский 354 МВ	2019	9,9	6,6	3,1	12,5	8,6	5,0	11,6	10,9	6,8
Зерноградский 354 МВ	2024	10,0	6,7	3,7	11,8	8,0	4,4	13,7	9,5	5,0
Зерноградский 401 АМВ	2014	8,3	5,7	3,4	10,1	7,2	4,5	11,9	8,9	6,7
Риф МВ	2014	8,3	7,8	3,8	10,7	9,9	5,4	12,7	11,8	7,8
РИК340МВ	2013	7,8	5,8	4,0	9,8	10,1	5,3	13,0	13,2	6,8
Космино	2024	9,6	7,6	3,5	12,0	8,6	4,6	13,5	9,1	7,2
Альбирео	2024	10,1	7,3	3,8	12,0	8,6	4,9	13,3	9,8	7,5
Контенто	2024	7,0	7,1	4,3	10,0	8,9	5,7	11,9	10,7	8,6
Ладожский 292 АМВ	2024	7,0	6,7	3,5	10,3	8,7	5,0	12,6	10,9	7,5
GS240	2024	9,4	6,2	3,9	11,1	7,9	5,7	12,7	8,9	7,7
Среднее значение, мм		8,7	6,6	3,6	11,0	8,4	5,1	12,9	10,2	7,3
Среднеквадратическое отклонение, мм		1,0	0,7	0,4	0,9	0,8	0,5	0,8	1,2	0,7
Коэффициент вариации, %		11,6	9,9	9,7	8,1	9,7	9,7	6,3	11,9	10,1
Минимальное значение, мм		7,0	5,7	3,0	9,8	7,2	4,4	11,6	8,9	5,0
Максимальное значение, мм		10,1	7,8	4,3	12,5	10,1	5,9	14,5	13,2	8,6
Подсолнечник										
СПК Кондитерский	2012	11,6	5,9	3,0	14,8	7,9	4,6	18,8	9,2	6,3
Мастер	2012	9,0	4,0	2,5	11,7	5,8	3,5	14,0	9,0	5,5
Альбатрос	2012	8,0	3,1	2,2	9,9	4,9	3,3	11,4	6,2	4,9
Лакомка (калиброванные)	2012	10,4	5,4	3,1	12,6	6,5	4,0	15,3	7,9	5,2
Лакомка (некалиброванные)	2013	6,9	4,0	2,7	13,1	6,8	4,1	16,7	9,6	5,9
П 64 ЛЕ 136	2011	6,9	3,7	2,0	10,0	5,6	3,3	11,7	7,0	5,1
П 64 ЛП 130	2012	8,3	3,2	2,5	10,2	5,9	3,7	12,1	7,8	6,3
Флагман	2012	9,1	3,0	2,2	11,2	5,7	3,5	13,5	10,4	6,4
Среднее значение, мм		8,8	4,0	2,5	11,7	6,1	3,8	14,2	8,4	5,7
Среднеквадратическое отклонение, мм		1,5	1,0	0,4	1,6	0,9	0,4	2,4	1,3	0,6
Коэффициент вариации, %		17,4	24,9	14,5	13,9	13,9	11,3	17,2	15,7	9,9
Минимальное значение, мм		6,9	3	2	9,9	4,9	3,3	11,4	6,2	4,9
Максимальное значение, мм		11,6	5,9	3,1	14,8	7,9	4,6	18,8	10,4	6,4

Примечание. *средняя фракция; **крупная фракция

Таблица 3

Характеристики вариативности размеров семян по сортам

Table 3

Dimensional variability of seeds across varieties

Гибрид, год сбора урожая		Среднее квадратическое отклонение, мм			Коэффициент вариации, %			Абсолютная ошибка измерений, мм		
		σ_a	σ_b	σ_c	V_a	V_b	V_c	m_a	m_b	m_c
Кукуруза										
Зерноградский 282 МВ	2012	0,8	0,7	0,9	7,9	8,6	18,1	0,05	0,04	0,05
Зерноградский 282 МВ	2014	0,8	0,6	0,7	7,3	7,5	14,5	0,05	0,03	0,04
Зерноградский 282 МВ сф	2024	0,8	0,6	0,8	7,6	8,1	13,1	0,05	0,04	0,05
Зерноградский 282 МВ кф	2024	0,7	0,8	0,7	6,3	8,6	12,0	0,05	0,05	0,05
Зерноградский 288 МВ	2019	0,8	0,8	0,7	6,3	8,6	12,1	0,05	0,05	0,04
Зерноградский 330 МВ	2014	0,8	0,6	0,7	7,3	8,7	16,0	0,05	0,03	0,04
Зерноградский 354 МВ	2019	0,8	0,7	0,6	6,3	8,6	12,1	0,05	0,04	0,03
Зерноградский 354 МВ	2024	0,7	0,5	0,2	6,3	6,8	5,3	0,05	0,03	0,01
Зерноградский 401 АМВ	2014	0,5	0,6	0,7	5,2	7,8	15,1	0,03	0,03	0,04
Риф МВ	2014	0,7	0,6	0,8	6,4	6,3	14,5	0,04	0,03	0,05
РИК340МВ	2013	0,9	0,8	0,4	6,6	11,4	8,7	0,05	0,05	0,02
Космино	2024	0,7	0,3	0,5	5,7	3,2	12,0	0,05	0,02	0,03
Альбирео	2024	0,6	0,3	0,7	4,7	3,8	13,3	0,04	0,02	0,05
Контенто	2024	0,7	0,5	0,9	7,0	6,1	15,4	0,05	0,03	0,06
Ладожский 292 АМВ	2024	0,8	0,8	0,8	7,4	9,0	15,7	0,05	0,05	0,05
GS240	2024	0,7	0,5	0,7	5,9	6,0	12,2	0,05	0,03	0,05
Среднее значение, мм		0,7	0,6	0,7	6,5	7,4	13,1	0,05	0,04	0,04
Среднекв. отклонение, мм		0,1	0,2	0,2	0,9	2,0	2,9	0,01	0,01	0,01
Коэффициент вариации, %		12,6	25,7	25,9	13,1	26,5	22,4	12,84	25,52	27,60
Минимальное значение, мм		0,5	0,3	0,2	4,7	3,2	5,3	0,03	0,02	0,01
Максимальное значение, мм		0,9	0,8	0,9	7,9	11,4	18,1	0,05	0,05	0,06
Подсолнечник										
СПК Кондитерский	2012	1,3	0,8	0,8	11,3	9,7	15,7	0,08	0,05	0,05
Мастер	2012	0,9	0,7	0,5	13,4	8,8	7,0	0,05	0,04	0,03
Альбатрос	2012	0,7	0,6	0,5	15,5	8,0	6,9	0,04	0,03	0,03
Лакомка (калиброванные)	2012	0,9	0,5	0,4	7,2	7,5	9,8	0,05	0,03	0,02
Лакомка (некалиброванные)	2013	1,5	0,8	0,5	11,1	12,4	11,6	0,09	0,05	0,03
П 64 ЛЕ 136	2011	0,7	0,5	0,5	7,3	9,6	15,2	0,04	0,03	0,03
П 64 ЛП 130	2012	0,7	0,6	0,4	6,5	10,8	11,4	0,04	0,03	0,02
Флагман	2012	0,9	0,8	0,6	7,6	14,0	16,0	0,05	0,05	0,03
Среднее значение, мм		1,0	0,7	0,5	10,0	10,1	11,7	0,05	0,04	0,03
Среднекв. отклонение, мм		0,3	0,1	0,1	3,1	2,1	3,5	0,02	0,01	0,01
Коэффициент вариации, %		29,3	18,4	22,8	31,2	20,5	29,5	29,30	18,39	22,84
Минимальное значение, мм		0,7	0,5	0,4	6,5	7,5	6,9	0,04	0,03	0,02
Максимальное значение, мм		1,5	0,8	0,8	15,5	14	16	0,09	0,05	0,05

Таблица 4

Характеристики взаимных отношений размеров семян по сортам

Table 4

Inter-variatal correlations among seed dimensions

Гибрид, год сбора урожая		Отношения средних размеров			Коэффициенты корреляции		
		a/b	a/c	b/c	r_{ab}	r_{ac}	r_{bc}
Кукуруза							
Зерноградский 282 МВ	2012	1,31	2,04	1,55	0,03	–0,37	0,16
Зерноградский 282 МВ	2014	1,48	2,43	1,64	0,33	–0,21	–0,02
Зерноградский 282 МВ сф	2024	1,28	1,69	1,32	–0,20	–0,48	0,11
Зерноградский 282 МВ кф	2024	1,32	2,07	1,57	0,04	0,08	0
Зерноградский 288 МВ	2019	1,30	2,07	1,59	–0,03	0,01	0,03
Зерноградский 330 МВ	2014	1,41	2,29	1,62	0,11	–0,03	0,24
Зерноградский 354 МВ	2019	1,45	2,50	1,72	–0,03	0,09	0,03
Зерноградский 354 МВ	2024	1,48	2,68	1,82	–0,01	–0,23	0,12
Зерноградский 401 АМВ	2014	1,40	2,24	1,60	0,08	–0,21	0,16
Риф МВ	2014	1,08	1,98	1,83	0,43	–0,03	–0,01
РИК340МВ	2013	0,97	1,85	1,91	–0,09	–0,09	0,85
Космино	2024	1,40	2,61	1,87	0,05	–0,31	–0,15
Альбирео	2024	1,40	2,45	1,76	0,04	–0,23	–0,12
Контенто	2024	1,12	1,75	1,56	–0,20	–0,19	–0,09
Ладожский 292 АМВ	2024	1,18	2,06	1,74	–0,07	–0,22	0,08
GS240	2024	1,41	1,95	1,39	0,07	–0,44	–0,07
Среднее значение, мм		1,31	2,17	1,66	0,03	–0,18	0,08
Среднекв. отклонение, мм		0,15	0,29	0,16	0,16	0,17	0,22
Коэффициент вариации, %		11,18	13,51	9,67	–	–	–
Минимальное значение, мм		0,97	1,69	1,32	–0,20	–0,48	–0,15
Максимальное значение, мм		1,48	2,68	1,91	0,43	0,09	0,85
Подсолнечник							
СПК Кондитерский	2012	1,97	3,87	1,97	0,33	–0,21	–0,02
Мастер	2012	2,25	3,60	1,60	0,11	–0,03	0,24
Альбатрос	2012	2,58	3,64	1,41	0,08	–0,21	0,16
Лакомка (калиброванные)	2012	1,93	3,35	1,74	0,22	0,08	0,36
Лакомка (некалиброванные)	2013	1,73	2,56	1,48	0,42	0,18	0,44
П 64 ЛЕ 136	2011	1,86	3,45	1,85	0,13	0,44	–0,01
П 64 ЛП 130	2012	2,59	3,32	1,28	0,13	0,36	0,09
Флагман	2012	3,03	4,14	1,36	0,29	0,19	0,06
Среднее значение, мм		2,24	3,49	1,59	0,21	0,10	0,17
Среднекв. отклонение, мм		0,43	0,44	0,23	0,11	0,23	0,16
Коэффициент вариации, %		19,0	12,5	14,5	–	–	–
Минимальное значение, мм		1,73	2,56	1,28	0,08	–0,21	–0,02
Максимальное значение, мм		3,03	4,14	1,97	0,42	0,44	0,44

Из данных таблицы 4 можно сделать следующие частные выводы:

1. Отношение средней длины исследуемых семян к их ширине (a/b) для кукурузы составляет 1,3, для подсолнечника – 2,2 мм.

2. Отношение средней ширины исследуемых семян к их толщине (b/c) для кукурузы составляет 1,7, для подсолнечника – 1,6 мм.

3. Отношение средней длины исследуемых семян к их толщине (a/c) для кукурузы составляет 2,2, для подсолнечника – 3,5 мм.

4. Построение моделей, предполагающих шаровидность семян подсолнечника и кукурузы^{11,12}[16], не в полной мере оправдано ввиду существенных значений отношения их основных размеров.

5. С определенными допущениями при рассмотрении плотных укладок семени кукурузы могут быть представлены как эллипсоиды вращения [15] с осью c (так как для них отношение a/b является наиболее близким к единице), а подсолнечника – как эллипсоиды вращения с осью a ($b/c \approx 1,6$).

6. Для рассматриваемых корреляционных связей исследуемых сортов кукурузы основное отклонение коэффициента корреляции в среднем составило: $\sigma_{rab} \approx 0,061$; $\sigma_{rac} \approx 0,059$; $\sigma_{rbc} \approx 0,059$; для семян подсолнечника – $\sigma_{rab} \approx 0,054$; $\sigma_{rac} \approx 0,054$; $\sigma_{rbc} \approx 0,055$.

7. Можно утверждать, что для семян кукурузы корреляционная связь между длиной (a) и шириной (b) отсутствует, между шириной (b) и толщиной (c) является неочевидной. В то же время между длиной (a) и толщиной (c), по усредненным данным, существует достоверная обратная корреляция, то есть для семян большей длины характерна меньшая толщина, что, видимо, связано с морфологическими особенностями формирования початка.

8. Для всех основных размеров семян подсолнечника наблюдается прямая корреляция, причем для пар измерений длина-ширина (ab) и ширина-толщина (bc) – достоверная.

Выводы

Полученные результаты носят приблизительный характер в силу неполного охвата сортов (гибридов) кукурузы и подсолнечника, допущенных к использованию, как в рассмотренных регионах, так и в стране в целом. Тем не менее для Северо-Кавказского

и Центрально-Черноземного регионов проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Вызывает сомнение правомерность применения моделей плотных укладок семян подсолнечника и кукурузы, предполагающих их шаровидность, так как отношение средних значений их основных размеров существенно превышает единицу (для кукурузы отношение длины к толщине составляет в среднем около 2,2, для подсолнечника – 3,5).

2. Для исследованных семян кукурузы характерны следующие усредненные размеры: длина – около 11 мм (при среднеквадратическом отклонении (СКО) около 0,9 мм); ширина – 8,4 мм (СКО $\approx 0,8$ мм); толщина – 5,1 мм (при СКО $\approx 0,5$ мм). Между сортами (гибридами) вариативность средних значений основных размеров семян относительно невелика и изменяется в диапазоне 8,1...9,7%. При этом корреляционные связи между длиной и шириной, а также между шириной и толщиной практически отсутствуют, а между длиной и толщиной семян существует обратная корреляция. С определенными допущениями при моделировании рабочих процессов сельскохозяйственных машин семяна кукурузы могут быть представлены в виде эллипсоидов вращения с осью, соответствующей их толщине.

3. Для исследованных семян подсолнечника характерны следующие усредненные размеры: длина – около 11,7 мм (при СКО $\approx 1,6$ мм); ширина – 6,1 мм (СКО $\approx 0,9$ мм); толщина – 3,8 мм (при СКО $\approx 0,4$ мм). Для всех основных размеров семян подсолнечника наблюдается прямая корреляция. При моделировании семени подсолнечника условно могут быть представлены в виде эллипсоидов вращения с осью, соответствующей их длине.

Полученные количественные характеристики распределения размеров семян пропашных культур могут быть использованы при подборе рациональных параметров решет семяочистительных и калибровочных машин, а также триерных цилиндров под семена конкретного сорта (гибрида), при прогнозировании показателей качества работы этих машин, при подборе необходимых диаметров дозирующих элементов аппаратов точного высева и т.д. Полученные данные могут быть применены при доопытной оценке функциональных характеристик, определении необходимых диапазонов и шага варьирования технологических параметров проектируемых сельскохозяйственных машин и оборудования, функционирование которых предполагается на принципах, отличающихся от применяемых традиционно.

¹¹ Бертов А.А. Интенсификация технологического процесса высева семян подсолнечника аппаратом пневматической сеялки: Дис. канд. ... техн. наук. Зерноград, 1983. 203 с.

¹² Краснов И.Н., Глобин А.Н., Касьяненко А.В., Кравченко И.А. и др. Механизация посева семян зерновых культур: Монография. Москва, 2025. 422 с

Список источников

1. Алдошин Н.В., Золотов А.А., Цыгуткин А.С., Лылин Н.А. Уборка бинарных посевов зерновых культур // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». 2016. № 3 (73). С. 11-17. EDN: WAGPID
2. Алдошин Н.В., Золотов А.А., Цыгуткин А.С. и др. Обоснование технологических параметров комбайнов на уборке белого люпина // Достижения науки и техники АПК. 2015. Т. 29, № 1. С. 64-66. EDN: TMZFXF
3. Алдошин Н.В., Золотов А.А., Цыгуткин А.С. и др. Оценка повреждений зерна белого люпина при уборке урожая // Тракторы и сельхозмашины. 2015. № 2. С. 26-29. EDN: TPDIVN
4. Khizhnyak V.I., Shchirov V.V., Nesmiyan A.Y. et al. Evaluation of the efficiency of row-crop seeders using vacuum and extrabaric seed metering methods. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference on Engineering Studies and Cooperation in Global Agricultural Production. 2021;659:012045. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/659/1/012045>
5. Оробинский В.И., Ворохобин А.В., Корнев А.С. и др. Влияние фракционного состава зернового вороха на уровень травмирования и посевные качества семян // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2021. Т. 14, № 3 (70). С. 12-17. EDN: YCNSXI
6. Борисенко И.Б., Мезникова М.В., Улыбина Е.И. Направления развития полосовой технологии производства пропашных культур // Парадигма аграрного образования в условиях цифровой экономики: Материалы Международной научно-практической конференции. 2019. С. 279-283. EDN: XBUIYM
7. Захаров А.М., Мурзаев Е.А. Влияние способа обработки междурядий на урожайность картофеля в системе органического земледелия // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2024. Т. 18, № 1. С. 74-80. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2024-18-1-74-80>
8. Воротников И.Л., Розанов А.В., Богатырев С.А., Гутуев М.Ш. Результаты моделирования влияния параметров полосовой обработки почвы на урожайность пропашных культур // Научная жизнь. 2021. Т. 16, № 3 (115). С. 350-358. EDN: HREOED
9. Барановский И.А. Физико-механические и аэродинамические свойства семян сахарной свеклы и кукурузы // Аграрная наука – сельскохозяйственному производству Сибири, Монголии, Казахстана, Беларуси и Болгарии: Сборник докладов XXIII Международной научно-технической конференции. Минск, 2020. С. 326-330. EDN: DWZYFM
10. Иванова З.А., Шогенов Ю.М., Нагудова Ф.Х. Технологические свойства зерна и посевные качества семян кукурузы в зависимости от способов сушки // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 5. С. 750. EDN: SZVTUL
11. Бунков А.Ю., Кудряшов С.П. Изменение количества и массы 1000 семян по годам, их влияние на урожайность семян сортов подсолнечника // Масличные культуры. 2023. № 3 (195). С. 12-18. EDN: LLWFUT
12. Кривошеев Г.Я., Игнатьев А.С., Лупинога Д.Р., Арженовская Ю.Б. Сравнительное изучение простых междурядных и трехлинейных гибридов кукурузы // Зерновое хозяйство России. 2022. Т. 14, № 4. С. 70-77. <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2022-82-4-70-77>
13. Кривошеев Г.Я., Шевченко Н.А., Игнатьев А.С. Результаты и перспективы селекции кукурузы в аграрном научном

References

1. Aldoshin N.V., Zolotov A.A., Tsygutkin A.S., Lylin N.A. Harvesting binary grain crops. *Vestnik of Federal State Educational Establishment of Higher Professional Education "Moscow State Agroengineering University named after V.P. Goryachkin"*. 2016;3(73):11-17. (In Russ.)
2. Aldoshin N.V., Zolotov A.A., Tsygutkin A.S., Suleev V.D., Kuznetsov A.E., Aladjev N.A., Malla Bahaa. Substantiation of technological parameters of harvesters for white lupine. *Achievements of Science and Technology of the Agro-Industrial Complex*. 2015;29;1:64-66. (In Russ.)
3. Aldoshin N.V., Zolotov A.A., Tsygutkin A.S., Aladyev N.A., Malla B., Suleev V.D., Kuznetsov A.E. Assessment of white lupine damage during harvesting. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2015;2:26-29. (In Russ.)
4. Khizhnyak V.I., Shchirov V.V., Nesmiyan A.Y., Avramenko F.V., Kochergin A.S. Evaluation of the efficiency of row-crop seeders using vacuum and extrabaric seed metering methods. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Ser. "International Conference on Engineering Studies and Cooperation in Global Agricultural Production"* 2021:012045. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/659/1/012045>
5. Orobinsky V.I., Vorokhobin A.V., Kornev A.S., Golovin A.D., Bachurin I.G., Pozhidaev I.A. Fraction composition of the grain heap and its influence on the level of grain damage and sowing qualities of seeds. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2021;14;3(70):12-17. (In Russ.)
6. Borisenko I.B., Meznikova M.V., Ulybina E.I. Trends for the development of strip technology in row crop production. *Paradigma agrarnogo obrazovaniya v usloviyakh tsifrovoy ekonomiki = Paradigm of agricultural education in the context of the digital economy: Proceedings of the International scientific and practical conference*. 2019:279-283. (In Russ.)
7. Zakharov A.M., Murzaev E.A. Impact of inter-row cultivation on potato tuber yields in organic farming. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024;18;1:74-80. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2024-18-1-74-80>
8. Vorotnikov I.L., Rozanov A.V., Bogatyrev S.A., Gutuyev M. Sh. Results of modeling the influence of the parameters of strip tillage on the yield of grass crops. *Scientific Life*. 2021;16;3(115):350-358. (In Russ.)
9. Baranovskiy I.A. Physico-mechanical and aerodynamic properties of sugar beet and maize seeds. In: *Agrarnaya nauka – sel'skokhozyaystvennomu proizvodstvu Sibiri, Mongolii, Kazakhstana, Belarusi i Bolgarii = Contribution of Agrarian Science to Agricultural Production of Siberia, Mongolia, Kazakhstan, Belarus, and Bulgaria: Proceedings of the XXIII International Scientific and Technical Conference*. Minsk; 2020:326-330. (In Russ.)
10. Ivanova Z.A., Shogenov Yu.M., Nagudova F.Kh. Technological properties of grain and seeding qualities of corn in dependence of drying methods. *Sovremennye problem nauki i obrazovaniya*. 2014;(5):750. (In Russ.)
11. Bunkov A.Yu., Kudryashov S.P. Changing of seed amount and 1000 seeds weight by years, their impact on seed yield of sunflower varieties. *Oil Crops*. 2023;3(195):12-18. (In Russ.)
12. Krivosheev G.Ya., Ignatiev A.S., Lupinoga D.R., Arzhenovskaya Yu.B. Comparative study of simple interline and three-way cross maize hybrids. *Grain Economy of Russia*. 2022;(4):70-77. (In Russ.) <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2022-82-4-70-77>
13. Krivosheev G.Ya., Shevchenko N.A., Ignatiev A.S. The results and prospects of maize breeding in the Agricultural Research Center "Donskoy".

центре «Донской» // *Зерновое хозяйство России*. 2020. № 6 (72). С. 32-38. <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2020-72-6-32-38>

14. Nesmiyan A., Khizhnyak V., Kravchenko L., Zubrilina E. Probabilistic modeling for dynamic processes. *E3S Web of Conferences*. 13th International Scientific and Practical Conference on State and Prospects for the Development of Agribusiness, INTERAGROMASH 2020. EDP Sciences, 2020. P. 05019. EDN: LWKEDF

15. Хижняк В.И., Мальцев П.С., Несмиян А.Ю., Кормильцев Ю.Г., Хижняк Д.В. Теоретическое исследование процесса дозирования семян с использованием нагнетающего воздушного потока // *Вестник аграрной науки Дона*. 2021. № 4 (56). С. 46-54. EDN: RBSIAK

16. Цыбулевский В.В., Матущенко А.Е., Полуэктов А.А. Определение размеров отверстий ячеек высевающего диска // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2021. № 3 (89). С. 112-115. EDN: XYISBD

Информация об авторах

¹ Несмиян Андрей Юрьевич, д-р техн. наук, профессор; nesmiyan.andrei@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5556-1767>; SPIN-код: 7736-8806

² Арженовский Алексей Григорьевич, д-р техн. наук, профессор; arzenovskiy@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3569-8934>; SPIN-код: 5549-4841

³ Хижняк Владимир Иванович, канд. техн. наук, доцент; hignyk@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0002-6913-9345>; SPIN-код: 2099-9140

⁴ Дубина Константин Павлович, канд. техн. наук, доцент; longonor@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0543-9306>; SPIN-код: 2537-0575; Researcher ID: GSD-2794-2022

^{1,3,4} Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ; 347740, Российская Федерация, Ростовская обл., г. Зерноград, ул. Ленина, 21

² Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Вклад авторов

А.Ю. Несмиян – руководство исследованиями, концептуализация, верификация данных, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;

А.Г. Арженовский – ресурсы, создание черновика рукописи; В.И. Хижняк – проведение исследований, формальный анализ; К.П. Дубина – проведение исследований, формальный анализ.

Конфликт интересов

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

Статья поступила 15.10.2025, после рецензирования и доработки 16.01.2026; принята к публикации 20.01.2026

Grain Economy of Russia. 2020;(6):32-38. (In Russ.) <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2020-72-6-32-38>

14. Nesmiyan A., Khizhnyak V., Kravchenko L., Zubrilina E. Probabilistic modeling for dynamic processes. *E3S Web of Conferences*. 13th International Scientific and Practical Conference on State and Prospects for the Development of Agribusiness, INTERAGROMASH 2020. EDP Sciences, 2020:05019. (In Russ.)

15. Khizhnyak V.I., Maltsev P.S., Nesmiyan A.Yu., Kormiltsev Yu.G., Khizhnyak D.V. Theoretical study of the seed metering process using a forced airflow. *Don Agrarian Science Bulletin*. 2021;4(56):46-54. (In Russ.)

16. Tsybulevsky V.V., Matuschenko A.E., Poluektov A.A. Determination of the hole sizes of seed cells. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2021;3(89):112-115. (In Russ.)

Author Information

Andrey Yu. Nesmiyan¹, DSc (Eng), Professor; <https://orcid.org/0000-0002-5556-1767>; nesmiyan.andrei@yandex.ru

Aleksey G. Arzhenovskiy², DSc (Eng), Professor; <https://orcid.org/0000-0002-3569-8934>; arzenovskiy@rgau-msha.ru

Vladimir I. Khizhnyak³, CSc (Eng), Associate Professor; <https://orcid.org/0009-0002-6913-9345>; hignyk@mail.ru

Konstantin P. Dubina⁴, CSc (Eng), Associate Professor; miltor1999@mail.ru; longonor@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0543-9306>; Researcher ID: GSD-2794-2022

^{1,3,4} Azov-Black Sea Engineering Institute of Don State Agrarian University; 347740, Russia, Zernograd, Rostov region, Lenina Str., 21.

² Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 127434, Russia, Moscow, Timiryazevskaya Str., 49

Author Contribution

A.Yu. Nesmiyan – research supervision, conceptualization, data verification, writing – manuscript review and editing; A.G. Arzhenovskiy – resources, writing – original draft; V.I. Khizhnyak – investigation, formal analysis; K.P. Dubina – investigation, formal analysis.

Conflict of interests

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

Received 15.10.2025; Revised 16.01.2026; Accepted 20.01.2026

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.789:621.785.532

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-1-54-63>

К определению угла заточки лезвий ножей измельчителей кормов, работающих в условиях абразивного изнашивания

Н.П. Аюгин¹, С.А. Яковлев², А.С. Кузин³, И.А. Калашников⁴^{1,2,3,4} Ульяновский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина; г. Ульяновск, Россия¹ nikall85g@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5151-9097>² jakseal@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0008-4962-4080>³ sashakyzin99@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0004-6866-9410>⁴ surskboy@vk.com

Аннотация. Упрочнение ножей и определение оптимального угла заточки в комплексе позволят продлить срок службы измельчителей кормов и машин перерабатывающей промышленности, а также повысить эффективность их работы. Исследования проведены с целью определения оптимального угла заточки лезвий ножей измельчителей кормов, подвергнутых объемной закалке с последующим низким отпускком, работающих в условиях абразивного изнашивания. Для экспериментальных исследований изготовили образцы ножей из стали У7 ГОСТ 1435-99 с углами заточки 10, 20 и 30°. После проведения их объемной закалки с последующим низким отпускком по всему сечению ножей наблюдали равномерную структуру из мелкоигольчатого мартенсита. Твердость ножей составила 740 HV, что в 2,96 раза выше исходной микротвердости металла 250 HV. Микроструктурное исследование поверхности ножей выявило наличие окислов железа на глубине до 0,079 мм по причине выгорания углерода в поверхностных слоях, поэтому предложено при закалке использовать печи с «контролируемой атмосферой». Износостойкость ножей исследовали на оригинальной лабораторной установке в течение 100 ч, в качестве абразива использовали кварцевый песок. Исходная острота режущих кромок ножей до испытания соответствовала 20...35 мкм. В условиях абразивного изнашивания наименьшее снижение остроты режущей кромки (120 мкм) характерно для ножей с углом заточки 10°, наибольшее (185 мкм) – при угле 30°. Наименьший износ, измеренный по изменению ширины ножа, характерен для ножей, имеющих угол заточки 30°, а наибольший – для ножей с углом заточки 10°. При резании корнеплодов и отсутствии ударных нагрузок оптимальный угол заточки лезвий ножа составляет 10°. Увеличение скорости от 5 до 7 м/с приводит к ускорению снижения остроты режущей кромки ножа на 81,5%. Полученные результаты исследований могут использоваться при проектировании измельчителей кормов.

Ключевые слова: упрочнение ножей измельчителей кормов; острота режущей кромки ножей; износостойкость ножей; износ; абразивное изнашивание; угол заточки; оптимальный угол заточки лезвий

Финансирование. Исследования выполнены за счет гранта Российского научного фонда № 24-26-00057; <https://rscf.ru/project/24-26-00057/>

Для цитирования: Аюгин Н.П., Яковлев С.А., Кузин А.С., Калашников И.А. К определению угла заточки лезвий ножей измельчителей кормов, работающих в условиях абразивного изнашивания // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 1. С. 54-63. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-1-54-63>

ORIGINAL ARTICLE

On determining the sharpening angle of knife blades used in feed grinders operating under conditions of abrasive wear

N.P. Ayugin¹, S.A. Yakovlev², A.S. Kuzin³, I.A. Kalashnikov⁴^{1,2,3,4} Ulyanovsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin; Ulyanovsk, Russia¹ nikall85g@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5151-9097>² jakseal@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0008-4962-4080>³ sashakyzin99@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0004-6866-9410>⁴ surskboy@vk.com

Abstract. Enhancing blade durability and determining optimal sharpening angles are critical for extending the service life and increasing the efficiency of feed choppers and industrial processing machinery. This study aims

to determine the optimal sharpening angle for feed chopper blades subjected to through-hardening (volumetric quenching) followed by low-temperature tempering under abrasive wear conditions. Experimental samples were fabricated from U7 steel (GOST 1435-99) with sharpening angles of 10°, 20°, and 30°. Heat treatment produced a uniform fine-needle martensite structure across the entire cross-section. The resulting hardness was 740 HV, a 2.96-fold increase over the initial microhardness of 250 HV. Microstructural analysis revealed decarburization-induced iron oxides at depths of up to 0.079 mm; consequently, suggesting that controlled-atmosphere furnaces should be used during quenching. Wear resistance was tested over a 100-hour period using a custom-made laboratory installation with quartz sand as the abrasive medium. The initial cutting-edge radius ranged from 20 to 35 µm. Under abrasive wear, the smallest increase in edge radius (blunting) was observed in the 10° blades (120 µm), while the 30° blades showed the greatest increase (185 µm). Conversely, the 30° sharpening angle exhibited the lowest overall width wear, while the 10° angle showed the highest. For cutting root crops without impact loads, the 10° sharpening angle is optimal. Furthermore, increasing the cutting speed from 5 to 7 m/s accelerated the dulling rate by 81.5%. These findings provide a technical basis for the design and maintenance of high-efficiency feed choppers and processing equipment

Keywords: hardening of feed chopper knives; sharpness of the cutting edge of knives; wear resistance of knives; wear; abrasive wear; sharpening angle; optimal sharpening angle of the blades

Funding. The research was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 24-26-00057, <https://rscf.ru/project/24-26-00057/>

For citation: Ayugin N.P., Yakovlev S.A., Kuzin A.S., Kalashnikov I.A. On determining the sharpening angle of knife blades used in feed grinders operating under conditions of abrasive wear. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(1):54-63 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-1-54-63>

Введение

Эффективность и долговечность режущего аппарата измельчителей кормов и машин перерабатывающей промышленности зависят от износостойкости ножей. Ножи, используемые в измельчителях, подвергаются высоким механическим нагрузкам и быстрому износу [1, 2], поэтому исследование процесса износа ножей и разработка методов повышения их износостойкости актуальны для сельскохозяйственного производства и перерабатывающей промышленности.

Разработке и исследованию различных методов повышения износостойкости ножей измельчителей кормов и машин перерабатывающей промышленности посвящено множество научных работ [3, 4, 5]. Однако до сих пор одним из наиболее распространенных способов повышения ресурса и износостойкости режущих рабочих органов современной техники является использование объемной закалки с последующим низким отпускком [6, 7]. Процесс закалки позволяет просто и эффективно повысить твердость и прочность структуры материала ножа. Упрочненные ножи более устойчивы к абразивному износу, что способствует снижению эксплуатационных затрат и стабильной работе измельчителей кормов, благодаря более продолжительному сроку службы ножей до перезаточки [1].

Помимо применения упрочняющих технологий, на износостойкость ножей влияет угол заточки. Достижение оптимального угла заточки обеспечивает

баланс между остротой и прочностью лезвия, что позволяет избежать преждевременного затупления ножа при воздействии на измельчаемый материал¹.

Проведенные исследования [8, 9] показывают, что оптимальный угол заточки ножа может варьироваться в зависимости от материала ножа, а также типа измельчаемого корма. Поэтому исследование износостойкости ножей измельчителей кормов и разработка методов повышения их ресурса, в том числе за счет использования упрочняющих технологий, а также определение оптимального угла заточки являются актуальной задачей. Применение ножей измельчителей кормов с повышенным ресурсом и оптимальным углом заточки позволит продлить срок службы оборудования и повысить эффективность его работы.

Цель исследований: определение оптимального угла заточки лезвий ножей измельчителей кормов, подвергнутых объемной закалке с последующим низким отпускком, работающих в условиях абразивного изнашивания.

Материалы и методы

Образцы ножей изготовлены из стали У7 ГОСТ 1435-99 с углами заточки 10, 20 и 30° (рис. 1). Исходная микроструктура металла

¹ Карпин В.Ю. Влияние угла заточки лезвия ножа на энергозатраты операции измельчения // Современные научные исследования и инновации. 2015. № 3. Ч. 1. С. 163-166. [Электронный ресурс]. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2015/03/48941> (дата обращения: 01.07.2024)

деталей представляет собой перлит сорбитообразный (ГОСТ 8233-56) с твердостью ~ 250 HV 0,3. Упрочнение ножей измельчителей кормов посредством объемной закалки осуществляли путем нагрева их в муфельной печи при температуре $800...830^{\circ}\text{C}$ с последующим охлаждением в масле. После закалки проводили низкий отпуск ножей при температуре 150°C .

Остроту лезвия ножа определяли, исходя из замера радиуса округления режущей кромки в нормальной секущей плоскости. Для этого в свинцовую пластину толщиной 1,5 мм под углом 90° вдавливали режущую кромку исследуемого ножа. Полученный

таким образом отпечаток измерялся с помощью отсчетного микроскопа Бринелля МПБ-2 (рис. 2). Исходная острота режущей кромки ножей до проведения исследований составила $20...35$ мкм.

Выбор исходных углов заточки ножей от 10 до 30° и остроты режущей кромки ножа до 50 мкм обусловлен результатами ранее проведенных исследований по определению изменения удельного усилия резания растительных материалов, выполненных на ротационном копре [10, 11, 12].

Результаты исследований по определению удельного усилия резания кормовой свеклы в зависимости от угла заточки и остроты режущей кромки

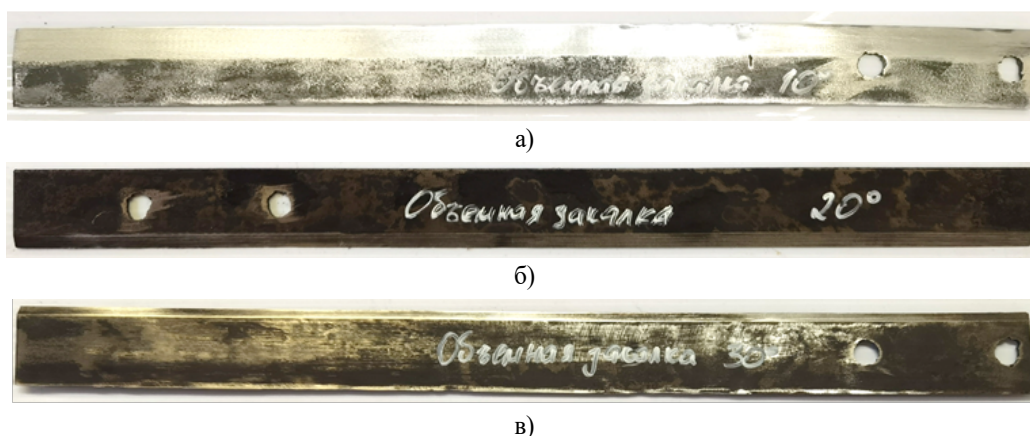


Рис. 1. Внешний вид испытуемых ножей с углом заточки 10° (а), 20° (б) и 30° (в)

Fig. 1. External view of the blades used in the tests:

a – 10° sharpening angle; b – 20° sharpening angle; c – 30° sharpening angle

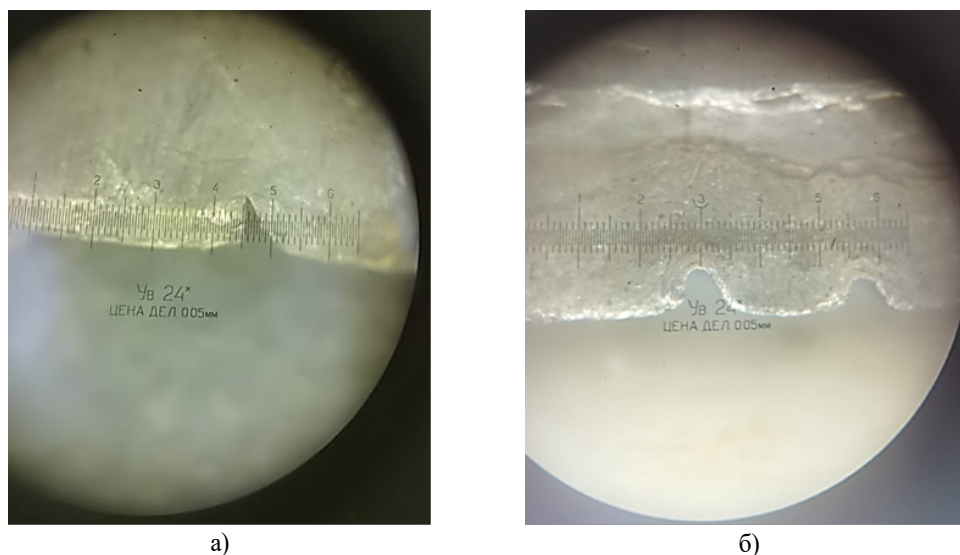


Рис. 2. Определение остроты режущей кромки ножа с углом заточки 30° по отпечатку на свинцовой пластине:

а – исходный отпечаток режущей кромки профиля ножа;
б – отпечаток режущей кромки профиля ножа после 100 ч испытаний

Fig. 2. Measuring the sharpness of the cutting edge of a blade with a 30° sharpening angle by the imprint on a lead plate:

а – initial imprint of the cutting edge of the blade profile;
б – imprint of the cutting edge of the blade profile after 100 hours of testing

ножа (рис. 3, 4), свидетельствуют о целесообразности обеспечения остроты режущей кромки от 20 до 50 мкм и минимально возможного угла заточки ножа для достижения минимальных энергозатрат измельчения. Схожие зависимости характерны и для других культур, используемых при заготовке кормов (сорго-суданковый гибрид, стебли кукурузы, початки кукурузы, кабачок, морковь, картофель, горох, люцерна).

При превышении угла заточки ножа более 35° фаска ножа начинает ломать корнеплод, что особенно выражено по мере повышения рабочей скорости ножа, поэтому значение оптимального угла заточки

ножей измельчителей кормов находится в интервале $10...30^\circ$ [10].

Изменение ширины ножа в процессе изнашивания измеряли микрометром МК-50 ГОСТ 6507-90, изменение массы – лабораторными весами Ohaus Pioneer PA213.

Исследование макро- и микроструктуры металла ножей проводили в сечении микрошлифа, вырезанного с выходом на режущие кромки детали. Макроструктуру стали ножей исследовали на стереоскопическом микроскопе MEIJI RZ при помощи анализатора изображений «Комплекс программно-аппаратного анализа микроструктуры поверхности твердых

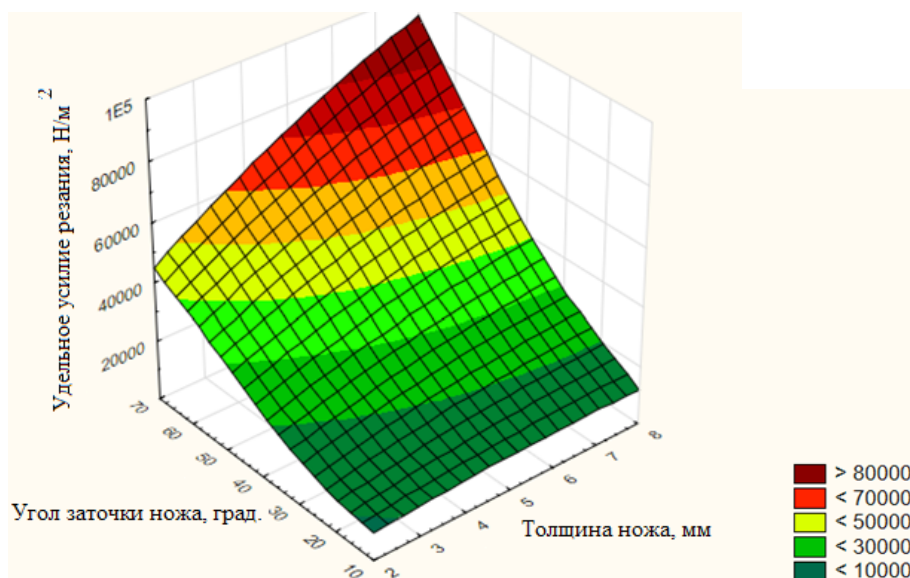


Рис. 3. Влияние толщины и угла заточки ножа на удельное усилие резания кормовой свеклы

Fig. 3. Effect of the blade's thickness and sharpening angle on the specific cutting force applied to fodder beet

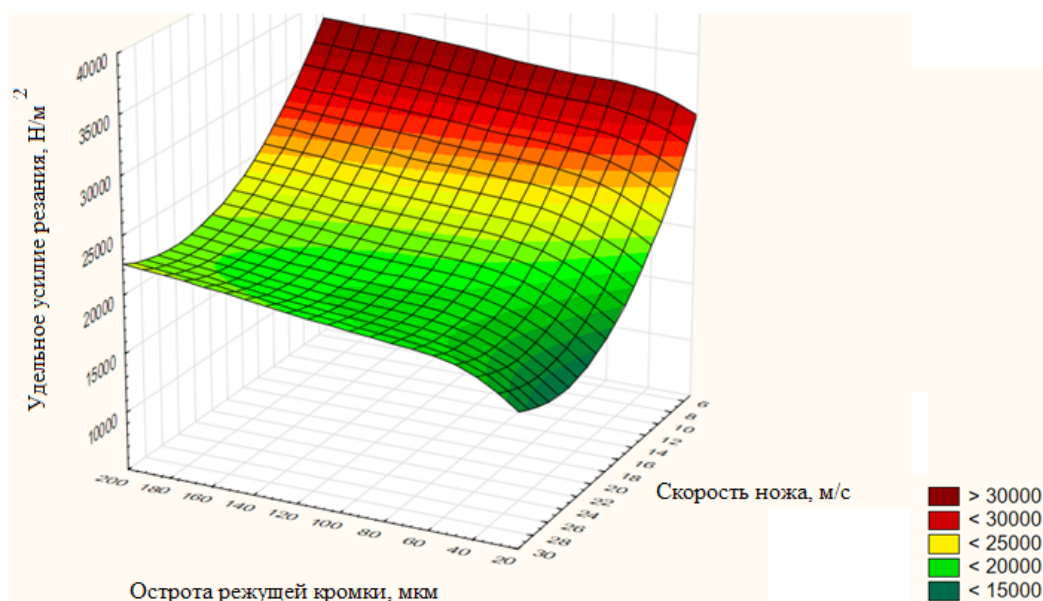


Рис. 4. График зависимости удельного усилия резания кормовой свеклы от остроты режущей кромки и скорости ножа

Fig. 4. Effect of cutting-edge sharpness and blade speed on the specific cutting force applied to fodder beet

тел "Thixomet"» [7] при увеличении до 16 крат. Твердость микроструктуры ножей по методу Виккерса (ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007) измеряли при нагрузке 3 Н (300 гс) [6] на микротвердомере MicroMet 5104.

Для проведения исследования износостойкости ножей была разработана оригинальная установка (рис. 5), включающая в себя пульт управления 1 и корпус 2, опирающийся на раму 3. На корпусе смонтированы крышки 8 и электродвигатель 4, который передает крутящий момент через ременную передачу 5 на вал 7 установки. Исследуемые ножи 10 фиксировали болтами на диске 9, который в свою очередь прикреплен к втулке, насаженной на вал 7. Диск имеет возможность перемещения

и фиксации на валу. На диске выполнены отверстия для установки ножей со смещением относительно оси вращения вала.

Диаметр корпуса лабораторной установки составил 900 мм, частота вращения вала – 172 мин^{-1} (угловая скорость – 18 рад/с), диаметр диска для крепления ножей – 300 мм. На ножах были нанесены насечки, соответствующие линейной скорости ножа 5, 6 и 7 м/с при указанной его угловой скорости.

Конструкция установки позволяет приблизить условия испытания различных образцов рабочих органов сельскохозяйственной техники и машин перерабатывающей промышленности к реальным условиям эксплуатации.

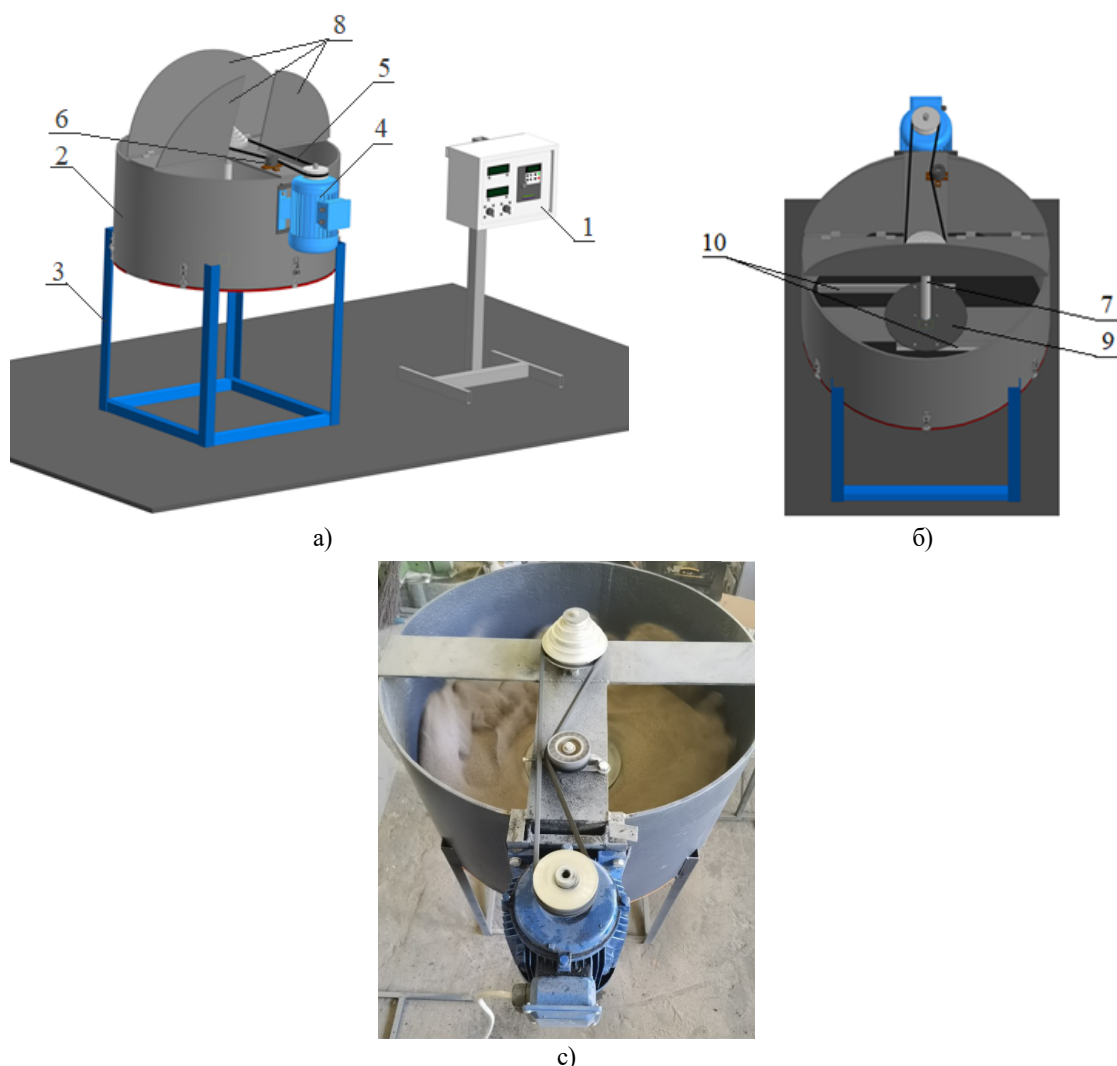


Рис. 5. Лабораторная установка для проведения исследования износостойкости ножей:

а – вид установки сбоку; б – вид корпуса сверху; в – вид установки сверху (при проведении испытаний);
1 – пульт управления; 2 – корпус; 3 – рама; 4 – электродвигатель; 5 – ременная передача;
6 – натяжной ролик; 7 – вал; 8 – крышки корпуса; 9 – диск; 10 – ножи

Fig. 5. Laboratory installation for testing the wear resistance of blades:

a – side view of the installation; b – top view of the body; c – top view of the laboratory installation (during testing);
1 – control panel; 2 – housing; 3 – frame; 4 – electric motor; 5 – belt drive; 6 – tension roller;
7 – shaft; 8 – housing covers; 9 – disc; 10 – blades

Продолжительность лабораторных исследований на износостойкость ножей составила 100 ч. В качестве абразива использовали кварцевый песок.

Результаты и их обсуждение

После объемной закалки с последующим низким отпуском по всему сечению ножа наблюдали равномерную структуру (рис. 6), представляющую собой мелкоигольчатый мартенсит (4 балла ГОСТ 8233-56) (рис. 7). Твердость структуры составила 740 HV при исходной микротвердости металла 250 HV.

Повышение микротвердости, зафиксированное после термообработки, свидетельствует о значительных изменениях в кристаллической структуре стали. Мартенситная структура, образующаяся в процессе закалки, характеризуется высокой плотностью дислокаций и внутренних напряжений, что непосредственно влияет на сопротивление материала пластической деформации. Мелкоигольчатый мартенсит, наблюдаемый в данном случае, способствует более равномерному распределению этих напряжений в объеме материала.

Низкий отпуск, проведенный после закалки, способствует снятию части внутренних напряжений, возникших в процессе мартенситного превращения, без значительного снижения твердости. Этот процесс позволяет оптимизировать баланс между твердостью и хрупкостью.

Столь значительное увеличение микротвердости (почти в 3 раза) указывает на эффективность выбранного режима термообработки для стали У7. Этот режим обеспечивает формирование оптимальной микроструктуры (сочетание высокой твердости и достаточной вязкости), необходимой для ножей, подвергающихся значительным нагрузкам в процессе эксплуатации. Дальнейшие исследования могут быть направлены на изучение влияния различных параметров термообработки (температуры закалки и отпуска, времени выдержки) на формирование микроструктуры и механические свойства стали У7 с целью оптимизации технологического процесса изготовления ножей.

Микроструктурное исследование поверхности ножей выявило наличие окислов железа на глубине до 0,079 мм по причине выгорания углерода в поверхностных слоях (рис. 8).



Рис. 6. Макроструктура ножей с углом заточки 30° после закалки и низкого отпуска, $\times 16$
Fig. 6. Macrostructure of blades with a 30° sharpening angle after quenching and low tempering, $\times 16$

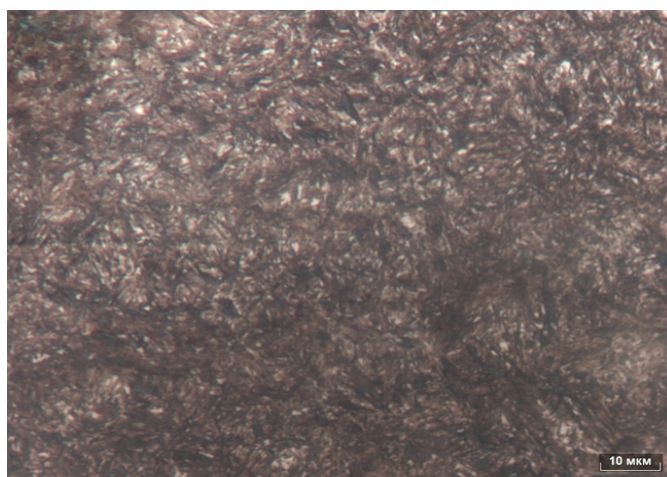


Рис. 7. Микроструктура ножа после термической обработки, $\times 1000$
Fig. 7. Microstructure of a blade after heat treatment, $\times 1000$

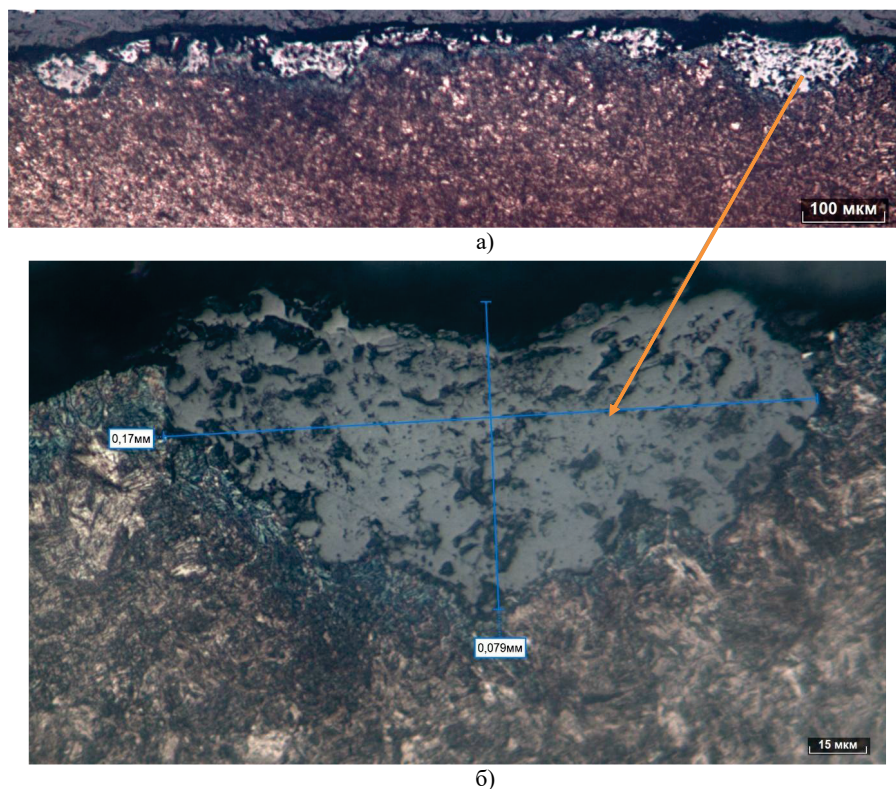


Рис. 8. Микроструктура поверхности ножа:
а – $\times 150$; б – $\times 700$

Fig. 8. Microstructure of the blade surface:
а – $\times 150$; б – $\times 700$

Окисление с образованием окалины препятствует получению высокой и равномерной твердости при закалке, приводит к изменению размеров и требует увеличения припусков на механическую обработку ножей. Чтобы избежать окисления и обезуглероживания ножей при нагреве, следует под закалку использовать печи с «контролируемой атмосферой» [7].

Зависимость изменения остроты режущей кромки упрочненного ножа (δ) от времени проведения исследования (T) при различных углах заточки представлена на рисунке 9. Острота режущих кромок ножей перед проведением износных испытаний составила 21...35 мкм; после 100 ч работы ножи с углами заточки 20 и 30° имели остроту лезвий 173 и 185 мкм соответственно. При этом наибольшее снижение показателя произошло в первые 20 ч. Нож с углом заточки 10° показал наилучшие результаты (120 мкм) по сравнению с остальными ножами, наибольший износ наблюдается в первые 10 ч испытаний.

Интенсивное изнашивание в начальный период исследований связано с недостаточной прочностью режущей кромки ножа и высокими удельными нагрузками, приходящимися на единицу площади. По мере увеличения износа и ширины

режущей кромки происходит снижение удельных нагрузок, что в конечном итоге приводит к снижению интенсивности изнашивания. Для сохранения остроты режущей кромки ножа и реализации эффекта самозатачивания целесообразным является замена объемной закалки на методы поверхностного упрочнения лезвия ножа на глубину от 50 до 80 мкм.

График изменения остроты лезвия ножа, заточенного под углом 20°, при скорости испытаний 5, 6 и 7 м/с свидетельствует о том, что по мере повышения скорости ножа происходит более интенсивное затупление его режущей кромки (рис. 10). После 100 ч испытаний при скорости ножа 5 м/с острота кромки снизилась до 108 мкм (в 4,9 раза), а при 7 м/с – до 196 мкм (в 5,72 раза).

График, характеризующий изменение ширины ножей в процессе исследования их износостойкости (рис. 11), свидетельствует о том, что наименьшее изменение ширины характерно для ножей с углом заточки 30°, а наибольшее – с углом заточки 10°, что в первую очередь связано с их геометрией.

Результаты исследований подчеркивают важность учета геометрических параметров ножей при оценке их износостойкости. Угол заточки является ключевым фактором, влияющим на долговечность лезвия

ножа и его способность сохранять свои первоначальные характеристики в процессе эксплуатации. Выбор угла заточки является компромиссом между остротой реза и долговечностью режущей кромки ножа.

Оптимальный угол заточки определяется прежде всего характером обрабатываемого материала и требованиями к энергоемкости процесса резания и качеству получаемого измельченного материала.

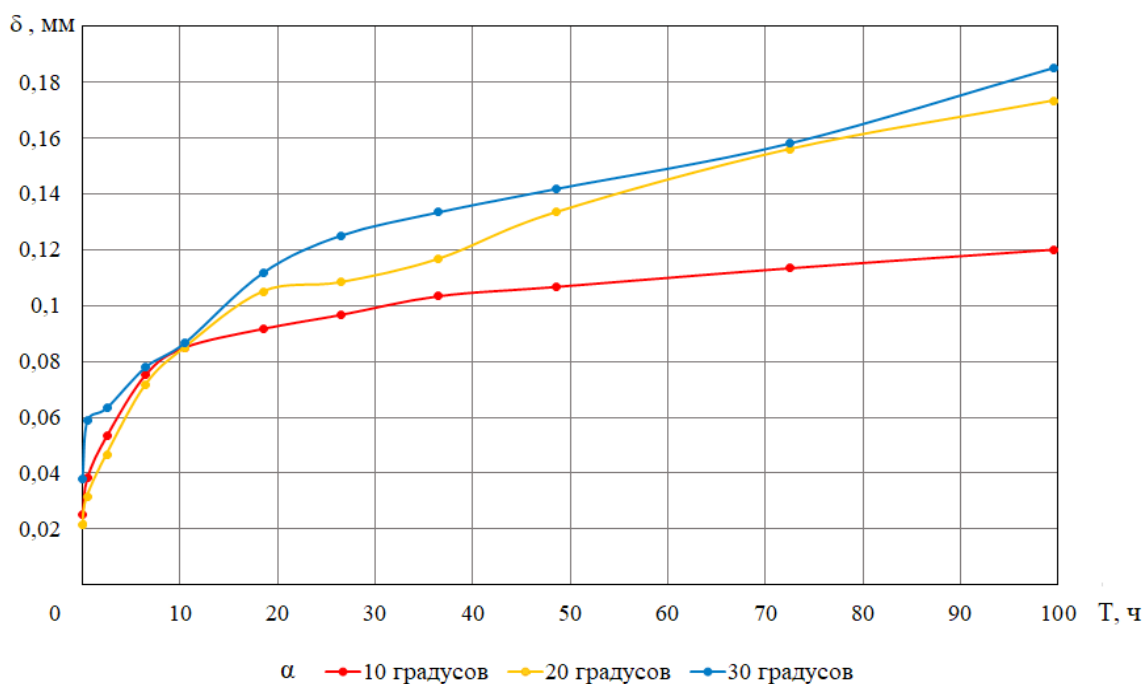


Рис. 9. Изменение остроты режущей кромки ножа (δ) от времени проведения исследования (T) при углах заточки $\alpha = 10^\circ, 20^\circ$ и 30° и линейной скорости ножей 6 м/с

Fig. 9. Variation in cutting-edge sharpness (δ) versus test time (T) at sharpening angles $\alpha = 10^\circ, 20^\circ$, and 30° and a linear blade speed of 6 m/s

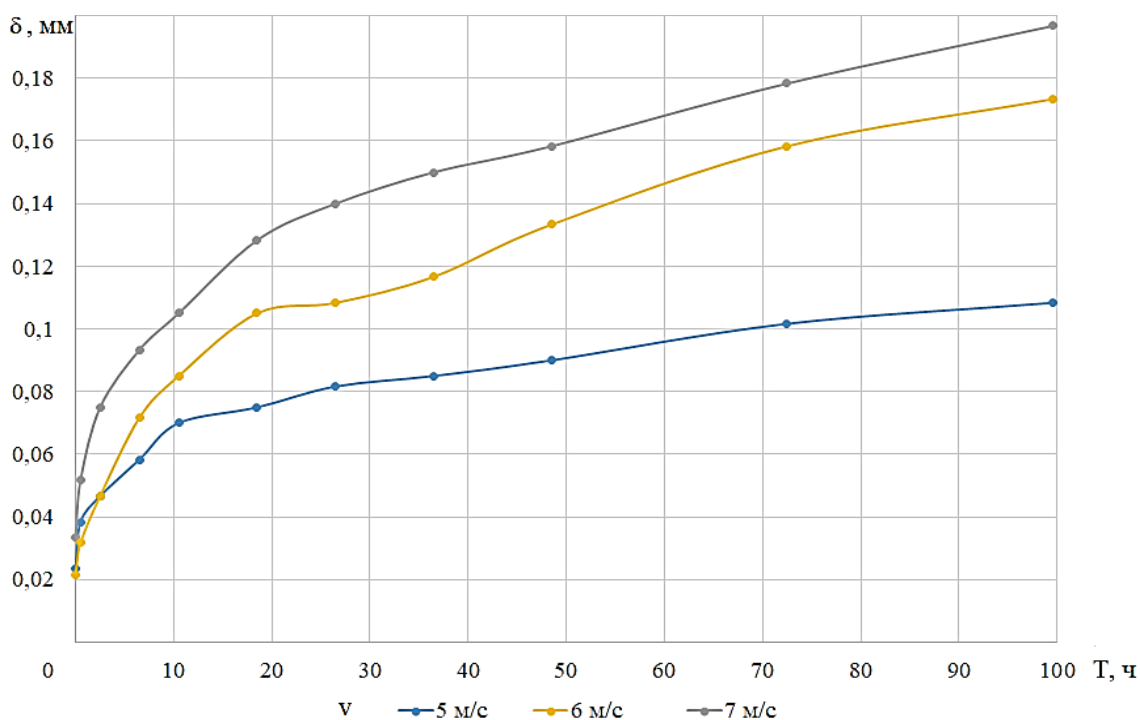


Рис. 10. Изменение остроты режущей кромки ножа (δ) с углом заточки 20° от времени проведения исследования (T) при скорости ножа 5, 6 и 7 м/с

Fig. 10. Variation in cutting-edge sharpness (δ) for a 20° sharpening angle versus test time (T) at blade speeds of 5, 6, and 7 m/s

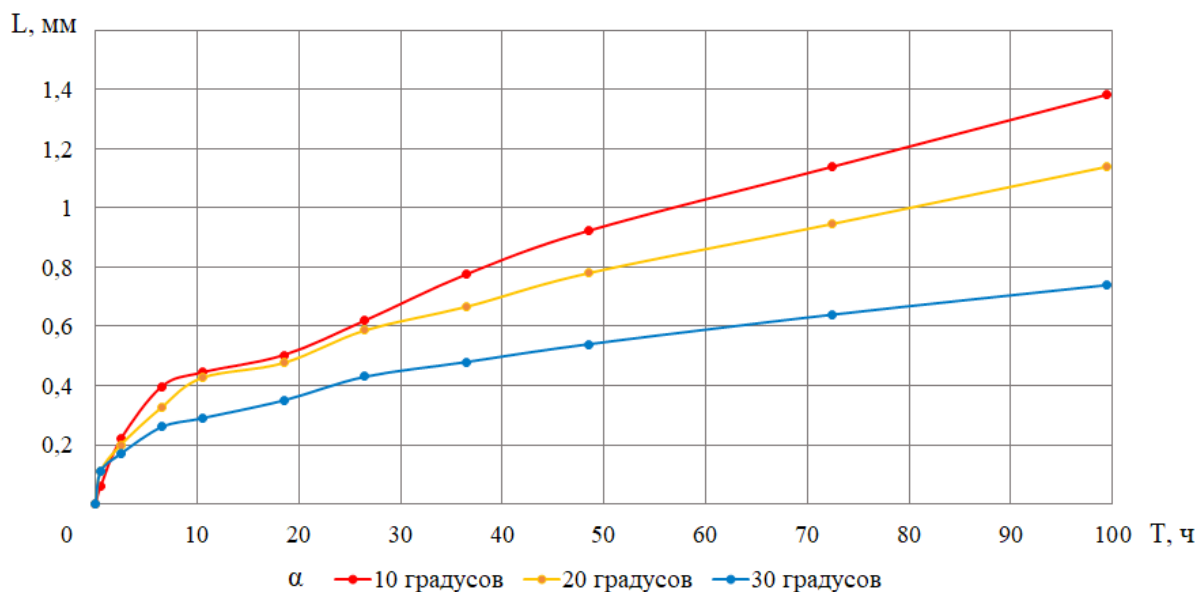


Рис. 11. Изменение ширины ножа (L) от времени проведения исследования (T) при различных углах заточки α и линейной скорости ножей 6 м/с

Fig. 11. Variation in blade width (L) versus test time (T) at various sharpening angles α and a linear blade speed of 6 m/s

Выводы

1. Исследования микроструктуры ножей, изготовленных из стали У7 и прошедших объемную закалку с последующим низким отпускком, показали, что микроструктура представляет собой мелкоигльчатый мартенсит с твердостью 740 HV, что 2,96 раза выше микротвердости ножа без его упрочнения. Изготовленные ножи, обладающие повышенной режущей способностью и износостойкостью по сравнению с ножами без упрочнения, целесообразно использовать в измельчителях кормов.

2. В условиях абразивного изнашивания наименьшее снижение остроты режущей кромки характерно

для ножей с углом заточки 10° , наибольшее – для ножей с углом 30° . Наименьший износ, определяемый по изменению ширины ножа, характерен для ножей, имеющих угол заточки 30° , а наибольший – при угле наклона лезвия 10° , что обусловлено их геометрией. При резании корнеплодов и отсутствии ударных нагрузок оптимальным является угол заточки ножа в 10° .

3. В условиях абразивного изнашивания скорость ножа обуславливает процесс затупления его режущей кромки. Повышение скорости от 5 до 7 м/с привело к ускорению снижения остроты режущей кромки ножа на 81,5%.

Список источников

1. Лялякин В.П., Аулов В.Ф., Ишков А.В. и др. Исследование износостойкости ножей в период эксплуатации и оценка эффективных методов их упрочнения // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2024. № 1. С. 97-106. <https://doi.org/10.31857/S0235711924010117>
2. Щербина В.И., Полуян В.А. Повышение износостойкости ножей барабанных измельчителей кормоуборочных комбайнов // Вестник аграрной науки Дона. 2012. № 1. С. 35-39. EDN: REUZCB
3. Сайфуллин Р.Н., Арбузов Р.Ф., Бирюков А.Л. Влияние режимов электроискровой обработки на износостойкость закаленных лезвий ножей // Технический сервис машин. 2023. Т. 61, № 3 (152). С. 87-93. EDN: XSQZEM
4. Сайфуллин Р.Н., Арбузов Р.Ф., Бирюков А.Л. Изучение влияния времени проведения электроискрового упрочнения на износостойкость закаленных лезвий ножей // Упрочняющие технологии и покрытия. 2024. Т. 20, № 10 (238). С. 458-463. EDN: SCOTJK
5. Яковлев С.А., Курдюмов В.И., Прошкин В.Е. и др. Результаты металлографических исследований режущих

References

1. Lyalakin V.P., Aulov V.F., Ishkov A.V., Kravchenko I.N., Rozhkov Y.N. Study of the wear resistance of knives during operation and assessment of effective methods for their strengthening. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*. 2024;1:97-106. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0235711924010117>
2. Shcherbina V.I., Poluyan V.A. Increase of knives durability of drum-type grinders of feed harvester combines. *Don Agrarian Science Bulletin*. 2012;1:35-39. (In Russ.)
3. Sayfullin R.N., Arbuzov R.F., Biryukov A.L. Influence of electric spark treatment modes on the wear resistance of hardened knives blades. *Machinery Technical Service*. 2023;61(3):87-93. (In Russ.)
4. Saifullin R.N., Arbuzov R.F., Biryukov A.L. Effect of electrospark hardening time on wear resistance of hardened knife blades. *Strengthening Technologies and Coatings*. 2024;20(10):458-463. (In Russ.)
5. Yakovlev S.A., Kurdyumov V.I., Proshkin V.E. et al. Results of metallographic studies of cutting parts of cultivator sweeps made of the 30MnB5 steel. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2024;91(5):637-645. (In Russ.)

частей культиваторных лап, изготовленных из стали 30MnB5 // Тракторы и сельхозмашины. 2024. Т. 91, № 5. С. 637-645. EDN: ZWB DYB

6. Яковлев С.А., Курдюмов В.И., Аюгин Н.П. и др. Результаты исследований структуры и микротвердости режущих частей лап культиваторов John Deere // Упрочняющие технологии и покрытия. 2023. Т. 19, № 12 (228). С. 538-542. EDN: AENUNN

7. Яковлев С.А., Курдюмов В.И., Глушенко А.А. и др. Обеспечение самозатачивания режущих частей рабочих органов сельскохозяйственной техники точечной электромеханической обработкой // Упрочняющие технологии и покрытия. 2021. Т. 17, № 9 (201). С. 419-423. EDN: EATYJI

8. Аюгин Н.П. К вопросу определения удельного усилия резания стеблей кукурузы // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2025. № 2 (70). С. 203-211. EDN: HVMNSG

9. Аюгин Н.П., Семашкин Н.М., Курдюмов В.И., Приказчиков В.С. К вопросу изучения процесса измельчения кабачков // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2024. № 4 (68). С. 182-191. EDN: KDZFLM

10. Аюгин Н.П., Семашкин Н.М., Курдюмов В.И., Романов Д.Б. Изучение процесса резания кормовой свеклы // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2024. № 4 (68). С. 173-181. EDN: DVDUXK

11. Аюгин Н.П. Определение удельного усилия резания початков кукурузы // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2025. № 2 (70). С. 212-220. EDN: DFHJRF

12. Ayugin N.P., Semashkin N.I., Romanov D.B. et al. The influence of design and kinematic parameters of the knife on the specific cutting force of the sorghum-sudan hybrid. *E3S Web of Conferences*. 2025;623:04011. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202562304011>

6. Yakovlev S.A., Kurdyumov V.I., Ayugin N.P. et al. Results of structure and microhardness of cutting parts of paws of John Deere cultivators. *Strengthening Technologies and Coatings*. 2023;19(12):538-542. (In Russ.)

7. Yakovlev S.A., Kurdyumov V.I., Gluschenko A.A., Sotnikov M.V., Petryakov S.N. Providing self-sharpening of the cutting parts of working bodies of agricultural machinery by point electro-mechanical processing. *Strengthening Technologies and Coatings*. 2021;17(9):419-423. (In Russ.)

8. Ipatov A.G., Shmykov S.N., Pervushin V.F., Malinin A.V. Hardening Schumacher Pro Cut segmented knives by laser hardening. *The Bulletin of Izhevsk State Agricultural Academy*. 2023;4(76):63-68. (In Russ.)

9. Karpin V.Yu. The influence of the sharpening angle of knife blade on the energy consumption of the chopping operation. *Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovatsii*. 2015;3-1:163-166. (In Russ.) URL: <https://web.snauka.ru/issues/2015/03/48941>

10. Ayugin N.P. On the issue of identification of the specific cutting force of corn stalks. *Vestnik of Ulyanovsk State Agricultural Academy*. 2025;2:203-211. (In Russ.)

11. Ayugin N.P., Semashkin N.M., Kurdyumov V.I., Priказчиков V.S. On the study of the zucchini crushing process. *Vestnik of Ulyanovsk State Agricultural Academy*. 2024;4:182-191. (In Russ.)

12. Ayugin N.P., Semashkin N.M., Kurdyumov V.I., Romanov D.B. Study of the cutting process of fodder beet. *Vestnik of Ulyanovsk State Agricultural Academy*. 2024;4:173-181. (In Russ.)

13. Ayugin N.P. Identification of the specific cutting force of corn cobs. *Vestnik of Ulyanovsk State Agricultural Academy*. 2025;2:212-220. (In Russ.)

14. Ayugin N.P., Semashkin N.I., Romanov D.B. et al. The influence of design and kinematic parameters of the knife on the specific cutting force of the sorghum-sudan hybrid. *E3S Web of Conferences*. 2025;623:04011. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202562304011>

Информация об авторах

¹ Аюгин Николай Петрович, канд. техн. наук, доцент; nikall85g@yandex.ru[✉]; SPIN-код: 8806-1652; <https://orcid.org/0000-0001-5151-9097>

² Яковлев Сергей Александрович, д-р техн. наук, профессор; jakseal@mail.ru; SPIN-код: 9968-2449; <https://orcid.org/0009-0008-4962-4080>

³ Кузин Александр Сергеевич, аспирант; sashakyzin99@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0004-6866-9410>

⁴ Калашников Илья Андреевич, аспирант; surskboy@vk.com^{1,2,3,4} Ульяновский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина; Российская Федерация, 432017, г. Ульяновск, бульвар Новый Венец, 1

Вклад авторов

Н.П. Аюгин – концептуализация, методология, руководство исследованиями, получение финансирования, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование; С.А. Яковлев – верификация данных, формальный анализ, создание черновика рукописи;

А.С. Кузин – ресурсы, проведение исследований; И.А. Калашников – визуализация, администрирование данных.

Конфликт интересов

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

Статья поступила 11.07.2025, после рецензирования и доработки 28.12.2025; принята к публикации 13.01.2026

Author Information

Nikolay P. Ayugin¹, CSc (Eng), Associate Professor; nikall85g@yandex.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0001-5151-9097>

Sergey A. Yakovlev², DSc (Eng), Professor; jakseal@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0008-4962-4080>

Aleksandr S. Kuzin³, postgraduate student; sashakyzin99@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0004-6866-9410>

Ilya A. Kalashnikov⁴, postgraduate student; surskboy@vk.com^{1,2,3,4} Ulyanovsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin; Novy Venets blvd., Ulyanovsk, 432017, Russian Federation

Author Contribution

N.P. Ayugin – conceptualization, methodology, research supervision, resources, writing – review and editing of the manuscript; S.A. Yakovlev – data verification, formal analysis, writing – original draft;

A.S. Kuzin – resources, investigation;

I.A. Kalashnikov – visualization, data curation.

Conflict of interests

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

Received 11.07.2025; Revised 28.12.2025; Accepted 13.01.2026

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 613.6.027:631.372

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-1-64-72>

Методические особенности оценки профессиональных рисков трактористов-машинистов

Ю.А. Широков¹, Р.Н. Егоров², Н.А. Мочунова³, Г.Е. Митягин⁴^{1,2,3,4} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия¹ shirokov001@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5196-7447>² egorov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8483-9692>³ mochunova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9131-4472>⁴ mityagin@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2667-9309>

Аннотация. Существующие методики оценки профессиональных рисков не учитывают объективных факторов, влияющих на их реализацию. Необходимо изменить подход к концепции оценки профессиональных рисков трактористов-машинистов. Целью исследований стало выявление не учитываемых в известных методиках производственных факторов, рабочей среды и возможностей повышения качества оценки профессиональных рисков трактористов-машинистов. Методика основана на изучении и обобщении материалов исследований влияния условий на рабочем месте и человеческого фактора при оценке профессиональных рисков. Уровень риска может зависеть от уровня финансового обеспечения мероприятий по улучшению условий и охраны труда, наличия вредных производственных факторов, повышающих утомляемость и снижающих внимание и скорость реакции (уровень шума и температура в кабине трактора). Показано, что повышение температуры на рабочем месте до 26...28°C снижает работоспособность по причине повышенной утомляемости на 20...25%. Установка систем кондиционирования не всегда снимает эту проблему, так как при температуре ниже 20°C повышаются утомляемость тракториста-машиниста на 15...20% и риск несчастных случаев. Аналогична и ситуация, связанная с шумом на рабочем месте: повышение шума на 10 ДБ пропорционально повышает утомляемость и снижает производительность труда. С целью учета факторов, влияющих на реализацию риска, при расчете коэффициентов опасности предложено использовать корректирующие коэффициенты, учитывающие влияние вредных производственных факторов, а также возраст на утомляемость тракториста-машиниста. Концепция введения корректирующих коэффициентов может быть положена в основу совершенствования методик по оценке профессиональных рисков и дальнейшему уточнению их значений. Предложенный методический подход повысит достоверность результатов оценки профессиональных рисков трактористов-машинистов.

Ключевые слова: тракторист-машинист; утомляемость тракториста-машиниста; профессиональный риск; оценка профессиональных рисков; методика; корректирующие коэффициенты

Для цитирования: Широков Ю.А., Егоров Р.Н., Мочунова Н.А., Митягин Г.Е. Методические особенности оценки профессиональных рисков трактористов-машинистов // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 1. С. 64-72. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-1-64-72>

ORIGINAL ARTICLE

Methodological features of professional risk assessment of tractor drivers

Yu.A. Shirokov¹, R.N. Egorov², N.A. Mochunova³, G.E. Mityagin⁴^{1,2,3,4} Russian State Agrarian University – Timiryazev Moscow Agricultural Academy; Moscow, Russian¹ shirokov001@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5196-7447>² egorov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8483-9692>³ mochunova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9131-4472>⁴ mityagin@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2667-9309>

Abstract. Existing occupational risk assessment methodologies often fail to sufficiently account for objective factors that influence risk realization. Consequently, there is a critical need to revise the conceptual approach to assessing risks for tractor and agricultural machinery operators. The study aims to identify overlooked

occupational and environmental factors to enhance the accuracy and quality of risk assessments. The methodology is based on a comprehensive synthesis of research regarding the impact of workplace conditions and human factors on safety. The study demonstrates that risk levels are significantly influenced by investments in occupational health and safety (OHS) measures, as well as the presence of environmental stressors – such as excessive noise and extreme cabin temperatures – that accelerate fatigue and impair attention and reaction speeds. Findings show that an increase in workplace temperature to 26-28°C reduces operator performance by 20-25%. Conversely, poorly regulated air conditioning (temperatures below 20°C) also increases fatigue and accident risk by 15-20%. Similarly, every 10 dB increase in noise level leads to a proportional rise in fatigue and a decline in productivity. To address these “risk intensification factors,” the authors propose the use of correction factors in hazard coefficient calculations. These factors account for the impact of environmental stressors, operator age, and other variables on fatigue. The proposed framework provides a scientific basis for refining occupational risk assessment methods and improving the reliability of safety evaluations for tractor and machinery operators.

Keywords: tractor driver; fatigue stress of a tractor driver; occupational risk; occupational risk assessment; methodology; correction factors

For citation: Shirokov Yu.A., Egorov R.N., Mochunova N.A., Mityagin G.E. Methodological features of professional risk assessment of tractor drivers. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(1):64-72 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-1-64-72>

Введение

Интенсивное развитие аграрных технологий и совершенствование машинно-тракторного парка, применение систем спутникового вождения повышают требования и к трактористам-машинистам как к основному человеческому ресурсу, обеспечивающему функционирование всей системы аграрных технологий [1, 2]. От работоспособности трактористов-машинистов зависят своевременность выполнения обязательных технологических операций, эффективность использования машинного времени и производительность труда [3].

Работоспособность и утомляемость трактористов-машинистов определяется, с одной стороны, теми условиями, которые созданы конструкторами и производителями тракторов и самоходных машин, с другой стороны – условиями труда, организованными работодателями. Однако в большинстве случаев эти условия не всегда соответствуют санитарно-гигиеническим требованиям, что ведет к повышенной утомляемости ежедневно и к профессиональным болезням при длительной работе [4].

В 2024 г. установлено более 4000 профзаболеваний трактористов-машинистов. Преимущественно профессиональные заболевания отмечены у опытных трактористов-машинистов со стажем 10 лет и более. За эти годы проявляются патология опорно-двигательного аппарата, органов дыхания, вибрационная болезнь и нейросенсорная тугоухость. Среди базовых причин, вызывающих профессиональные заболевания, отмечаются конструктивные недостатки машин и оборудования, несовершенство технологических

процессов, несоблюдение требований охраны и безопасности труда [5].

Трактористы-машинисты постоянно находятся в зоне неприемлемого риска несчастных случаев, вследствие чего ежегодно сотни несчастных случаев приводят к инвалидности или к смертельным исходам. Все перечисленное снижает престиж профессии и может поставить под угрозу продовольственную безопасность страны.

Для решения накопленных проблем необходима системная работа конструкторов и производителей сельскохозяйственных машин, организаторов полевых и ремонтных работ, служб охраны и безопасности труда. Основой для принятия объективных управленческих решений может быть достоверная оценка профессиональных рисков заболеваний и несчастных случаев в каждом предприятии аграрного бизнеса.

Оценка профессиональных рисков регламентирована в качестве обязательной процедуры изменениями Трудового кодекса РФ 2022 г. Для этого разработан и рекомендован ряд методик, позволяющих выполнить оценку профессиональных рисков. Однако накопленный опыт их применения показывает, что многие объективные факторы, серьезно влияющие на реализацию профессиональных рисков, в методике не учтены [6, 7].

Цель исследований: выявление неучитываемых факторов трудового процесса и рабочей среды, оказывающих влияние на реализацию профессиональных рисков и концептуальных возможностей повышения качества оценки профессиональных рисков трактористов-машинистов.

Материалы и методы

Методика основана на изучении и обобщении материалов исследований по влиянию условий на рабочем месте и человеческого фактора на утомляемость, снижение внимания и скорости реакций, что должно быть учтено при оценке профессиональных рисков трактористов-машинистов [4, 5].

Оценка профессиональных рисков – это процесс анализа вероятности наступления нежелательных событий на данном рабочем месте и потенциального ущерба от этих событий для жизни и здоровья работника.

Не все рекомендованные методы оценки профессиональных рисков позволяют выполнить ее с достаточной достоверностью. Многие авторы отмечают отсутствие единых понятий, терминов и определений в области управления профессиональными рисками даже в более простых условиях труда работников других профессий. Применяются многочисленные узконаправленные методики для отдельных отраслей, профессий, видов деятельности, что затрудняет их эффективное использование [8, 9].

Качественные методы оценки профессиональных рисков основаны на субъективной оценке уровня риска с использованием экспертных мнений и описательных характеристик. Оценки «Низкий риск» или «Высокий риск» не позволяют принять четко направленных решений и эффективно управлять снижением рисков.

Количественные методы являются более точными и позволяют объективнее сопоставлять риски на рабочих местах разных профессий и организаций. Все эти методы сводятся к вероятностной оценке рисков, но при этом требующей значительного массива исходной информации¹. При этом ни одна из рекомендованных методик не учитывает ряда объективных факторов, заметно влияющих на реализацию риска.

Результаты и их обсуждение

Анализ влияния кадрового обеспечения служб охраны труда на реализацию риска несчастных случаев и травматизма показал, что в тех сельскохозяйственных предприятиях, где работы по охране и безопасности труда делегированы специалистам, выполняющим требования профессионального стандарта

¹ Стандарт СТО.СУОТ.Р. –01-01-19 «Идентификация опасностей, оценка и управление профессиональными рисками. Оценка результативности принятых мер по снижению уровня профессиональных рисков». Ассоциация «Объединение организаций, оказывающих услуги в области охраны труда, 2019. С. 32.

40.054, уровень травматизма и профзаболеваний минимален. Так, если принять этот уровень за 1, то данный показатель растет примерно на 20%, когда должность специалиста по охране труда занимает специалист с высшим инженерным образованием; когда со средним специальным – в 1,5 раза; со средним общим – в 2,5 раза. А там, где данную работу поручают работнику с начальным образованием (практику), эти показатели возрастают в 3,3...3,5 раза. Эти данные подтверждены в национальном стандарте ГОСТ Р 12.0.011-2017: «...вероятность наступления несчастного случая» связана со «...степенью нашей недоработки по его предотвращению». Другими словами, при оценке профессионального риска работников необходимо учитывать уровень компетенции специалистов служб охраны труда аграрных предприятий, которые обязаны разрабатывать и организовывать реализацию мероприятий по снижению профессиональных рисков трактористов-машинистов.

С квалификацией специалистов по охране труда тесно связан уровень финансирования мероприятий по улучшению условий труда. Недостаточный уровень компетенции не позволяет работодателю обосновать необходимость выполнения мероприятий по охране и безопасности труда, показать связь этих мероприятий с повышением производительности труда и ростом рентабельности бизнеса [6]. На предприятиях аграрного бизнеса на мероприятия по улучшению условий и безопасности труда в среднем расходуется 5...8 тыс. руб. на работника, тогда как в машиностроении, при добыче полезных ископаемых и в строительстве эти расходы достигают 13...14 тыс. руб. Соответственно в этих сферах снижается риск несчастных случаев, уменьшается число пострадавших работников (рис. 1).

При оценке риска важно учитывать и возрастные различия когнитивных способностей работников, влияющих на безопасность труда трактористов-машинистов: внимание, скорость реакции, рабочая память и др. [6, 7]. С повышением возраста происходят естественные и неотвратимые физиологические процессы, влияющие на когнитивные способности человека, напрямую связанные с вероятностью произвольных ошибок в процессе трудовой деятельности: изменяются рабочая память (рис. 2а), скорость обработки информации (рис. 2б), и как следствие – скорость принятия решения и скорость реакции на чрезвычайные ситуации [8-10].

Необходимо учитывать изменения когнитивных способностей человека при подготовке процесса

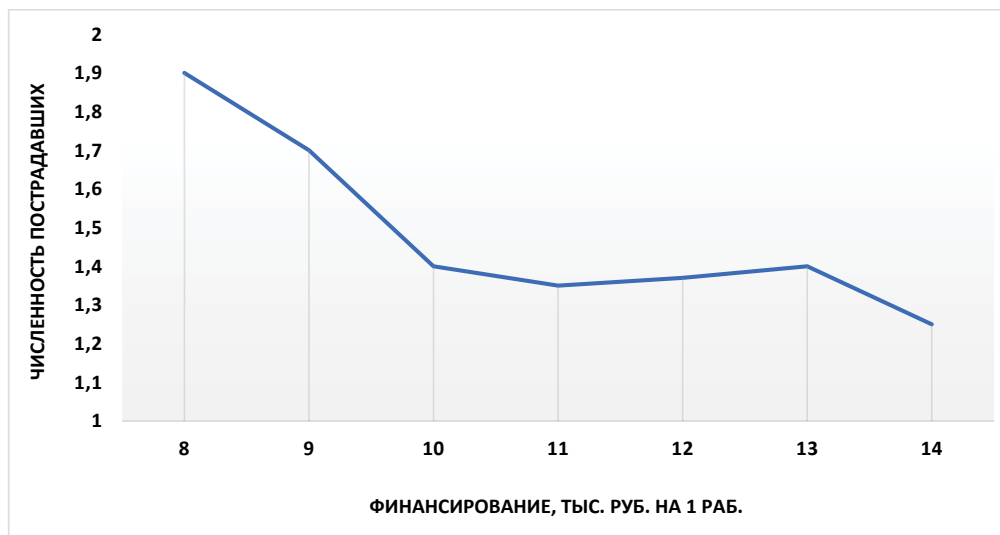


Рис. 1. Связь числа пострадавших от несчастных случаев работников с уровнем финансирования мероприятий по улучшению охраны и условий труда
(разработано авторами на основе материалов исследований [6])

Fig. 1. Relationship between occupational accident rates and funding levels for safety and health measures
(Prepared by the authors based on research data from [6])

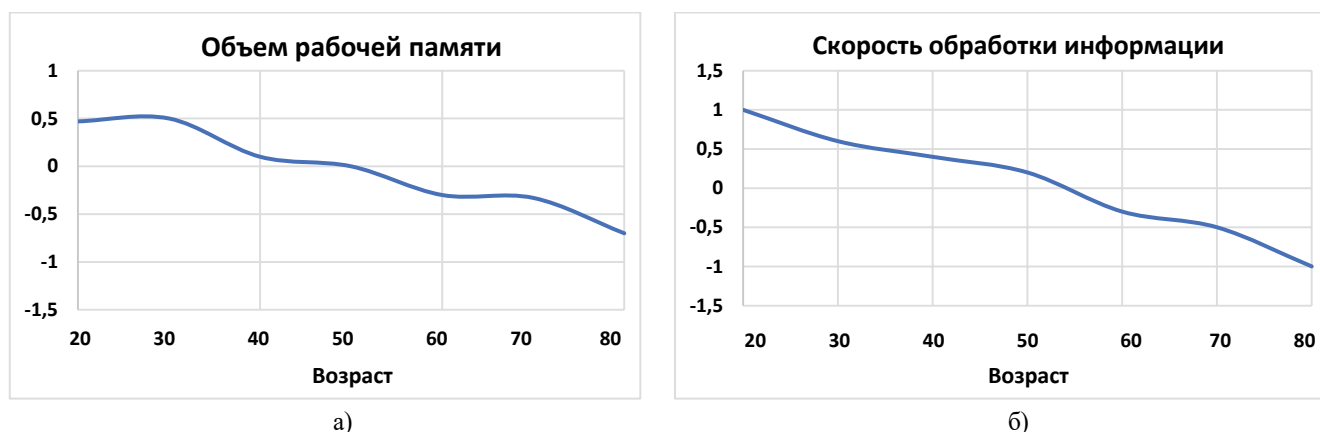


Рис. 2. Изменение объема рабочей памяти (а) и скорости обработки информации (б) с возрастом
(разработано авторами на основании анализа исследований [10])

Fig. 2. Age-related changes in working memory capacity (a) and information processing speed (б)
(Prepared by the authors based on [10])

оценки и управления рисками. Учет этих закономерностей становится особенно актуальным в связи с ростом числа работников старше 60 лет ввиду повышения пенсионного возраста.

На утомляемость тракториста-машиниста в любом возрасте влияют вредные производственные факторы, уровень которых методики оценки риска не учитывают. Достаточно показать, например, только один из параметров микроклимата на рабочем месте – уровень температуры воздуха [11, 12] (рис. 3).

Исследования Ф.М. Шлейфмана показали, что в летнее время повышение температуры на рабочем месте до 26...28°C снижает производительность труда вследствие снижения работоспособности по причине повышенной утомляемости на 20...25%.

По данным Ф.М. Шлейфмана, в реальных условиях эксплуатации машинно-тракторных агрегатов наблюдалось следующее:

– Тракторы мощностью 80 л.с. При температуре наружного воздуха 21...29°C его значение в кабине составило 24...38°C. В особо жаркие дни (35...36°C) при открытых дверцах и окнах температура на уровне пола достигала 41...43°C, у потолка – 39...42°C. При закрытых окнах и дверцах температура воздуха в кабине превышала наружную на 7...14°C.

– Тракторы мощностью 35...40 л.с. Температура в кабине была выше наружной на 4...6°C.

– Трактор К-700. В закрытой кабине летом температура воздуха в течение дня повышалась до 39,4°C.



Рис. 3. Влияние температуры воздуха на рабочем месте на производительность труда вследствие утомляемости работника
(разработано авторами на основании анализа материалов исследований Ružić et al. [11])

Fig. 3. Influence of workplace temperature on labor productivity as a function of an operator's fatigue
(Prepared by the authors based on Ružić et al [11])

– При работе весной и осенью температура воздуха в кабине составляла 0,9...5,1°C. Перепад температуры воздуха по вертикали увеличивался до 15°C. В результате исследований была установлена значительная разность температур между левой (правой) ногой и головой оператора – 4...4,4 и 1,8...2,1°C соответственно.

Установка систем кондиционирования не всегда снимает эту проблему, так как работник стремится установить летом температуру ниже 20°C, что в меньшей степени, но повышает утомляемость (на 15...20%). Но при выходе из кабины в поле к рабочим агрегатам для контроля, регулировок, загрузок семян, агрохимикатов и др. повышается и риск простудных заболеваний в связи с перепадом температур.

Практика показывает, что наличие кондиционера создает еще один риск для здоровья трактористов-машинистов – легионеллез – болезнь, вызываемую бактериями «*Legionella pneumophila*», которые развиваются в условиях теплой влажной среды фильтров кондиционеров при накоплении органической или почвенной пыли. Это требует серьезного подхода к своевременному обслуживанию кондиционеров тракторов и мобильных сельскохозяйственных машин.

Еще один из неучитываемых, но серьезно влияющих на профессиональный риск трактористов-машинистов факторов – шум на рабочем месте [13, 14], что вызывает развитие нейросенсорной тугоухости, повышение ежедневной утомляемости, снижающей производительность труда (рис. 4), и не только. Утомляемость по причине постоянного шума выхлопной

системы двигателя трактора, движущихся рабочих органов прицепных или навесных машин снижает внимание, скорость реакции, что повышает риски несчастных случаев.

Также на уровень шума влияет расположение рабочего места относительно источников шума: на малоомощных тракторах тракторист-машинист часто оказывается ближе к двигателю, что обуславливает относительно более высокий уровень шума.

Тракторы производства Волгоградского тракторного завода выпуска 1993-2000 гг. имели уровень шума 78...80 дБА, что соответствовало санитарным правилам по устройству тракторов и сельскохозяйственных машин – 80 дБА. После модернизации кабины уровень шума в тракторе «Агромаш-90ТГ 1040А» производства Волгоградского тракторного завода выпуска 2012-2015 гг. повысился до 88...90 дБА. В кабинах тракторов типа «Кировец» летом уровень шума превышает нормативные требования в среднем на 11...12 дБА. В кабинах тракторов ДТ-75 уровень шума значительно выше допустимого уровня и достигает 105 дБА. Методиками оценки профессиональных рисков отмеченные факторы не учтены².

Зная особенности влияния перечисленных факторов на утомляемость, рабочую память, скорость реакции, можно более уверенно управлять профессиональными рисками трактористов-машинистов. Для этого при оценке профессиональных рисков

² Стандарт СТО.СЮТ.Р. –01-01-19 «Идентификация опасностей, оценка и управление профессиональными рисками. Оценка результативности принятых мер по снижению уровня профессиональных рисков». Ассоциация «Объединение организаций, оказывающих услуги в области охраны труда», 2019. С. 32.

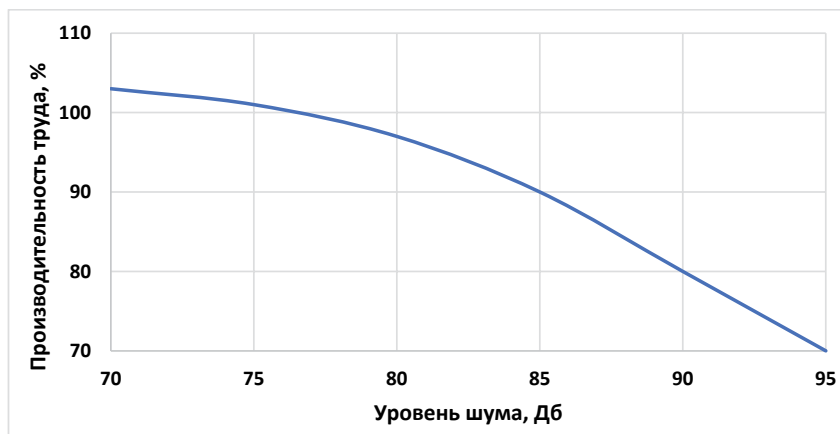


Рис. 4. Влияние уровня шума на рабочем месте на производительность труда вследствие утомляемости работника
(разработано авторами на основании исследований [13, 14])

Fig. 4. Influence of workplace noise level on labor productivity as a function of an operator's fatigue
(Prepared by the authors based on [13, 14])

целесообразно ввести дополнительные элементы в расчет индекса профессионального риска.

Предложения к совершенствованию методики оценки профессиональных рисков трактористов-машинистов. Расчет профессионального риска (R) на рабочем месте предлагается производить на основе расчета известного индекса профессионального риска $R_{пр}$ по формуле:

$$R_{пр} = V_{оп} \cdot P_{оп} \cdot F_{оп},$$

где $V_{оп}$ – вероятность опасности, баллы по 10-балльной шкале; $P_{оп}$ – подверженность опасности, баллы по 10-балльной шкале; $F_{оп}$ – последствия опасности, баллы по 10-балльной шкале.

Это поможет оценить уровень проблемы и понять, как срочно и какие меры необходимо принять. Полученные результаты расчетов сопоставляют с данными таблицы 1.

В качестве примера такого подхода оценим риск падения тракториста при выходе из кабины, чтобы очистить рабочие органы агрегируемых машин от налипания почвы и пожнивных остатков. Допустим, что возраст тракториста-машиниста – 55 лет, уровень шума в кабине трактора составляет 90 дБ, а температура воздуха достигает 28°C.

А) Вероятность опасности: в результате опроса экспертов определяем, что это 2 балла из 10, так как риск является нехарактерным, поскольку статистика показывает регистрацию только трех несчастных случаев на 1000 работников в этом процессе за последние три года. Однако утомление работника вследствие воздействия внешних факторов (шум, высокая или низкая температура в кабине трактора) повысит риск. Чтобы учесть эти значения, введем корректирующие показатели.

Корректирующие показатели могут быть определены по результатам исследований влияния фактора производственной среды и трудового процесса на утомление работника (косвенно – на снижение производительности труда). Например, для определения корректирующего показателя влияния шума в 90 дБ на утомление отметим на рисунке 5 точку пересечения условной вертикальной линии от значения 90 дБ на шкале уровня шума и проведем горизонтальную линию до пересечения со шкалой производительности труда (утомление). Получаем 80%, или 0,8 в относительных единицах.

Корректирующий показатель влияния шума k_n получаем в результате анализа данных рисунка 4 (табл. 2).

Балльная оценка и значимость риска³

Таблица 1

Table 1

Scoring and the importance of risk³

Значимость риска	Оценка риска, баллы
Малый риск	0...20
Умеренный риск	21...70
Значительный риск	71...200
Высокий риск	201...400
Сверхвысокий риск	400...1000

³ Стандарт СТО.СУОТ.Р-01-01-19 «Идентификация опасностей, оценка и управление профессиональными рисками. Оценка результативности принятых мер по снижению уровня профессиональных рисков». Ассоциация «Объединение организаций, оказывающих услуги в области охраны труда», 2019. С. 32.

Таблица 2

Корректирующий показатель влияния шума

Table 2

Correction indicator of the noise effect

Уровень шума, дБ	80	84	90	92	96	100
Корректирующий показатель, k_h	1,0	0,92	0,8	0,76	0,7	0,6

Вероятность опасности (Vk_{onh} , балл) падения работника, утомленного воздействием шума, –

$$Vk_{onh} = V_{on} / k_h,$$

где V_{on} – вероятность опасности, баллы по 10-балльной шкале; k_h – корректирующий коэффициент, учитывающий влияние шума на рабочем месте на утомление работника.

Для оценки влияния отклонения температуры от оптимальных значений введем корректирующий коэффициент теплового влияния k_t (табл. 3).

Вероятность опасности падения работника, утомленного воздействием неоптимальной температуры, –

$$Vk_{ont} = V_{on} / k_t,$$

где V_{on} – вероятность опасности, баллы по 10-балльной шкале; k_t – корректирующий коэффициент, учитывающий влияние температуры на утомление работника.

Б) Подверженность риску – 3 балла по 10-балльной шкале (оценивается экспертно или на основании статистики несчастных случаев). Для этой характеристики введем корректирующий коэффициент возраста k_r (табл. 4).

Подверженность опасности падения возрастного работника (возрастание вероятности с возрастом) –

$$Pk_{пра} = P_{пр} / k_a,$$

где $P_{пр}$ – подверженность риску, баллы по 10-балльной шкале; k_a – корректирующий коэффициент, учитывающий влияние возраста на подверженность работника риску.

В) Последствия реализации риска – 4 балла по 10-балльной шкале, так как при оценке последствий желательно выбирать наиболее худший случай (есть вероятность того, что тракторист-машинист может получить тяжелую травму). Последствия травмы, их тяжесть и период восстановления также находятся в зависимости от возраста:

$$Fk_{пра} = F_{пр} / k_a,$$

где $F_{пр}$ – вероятность тяжести последствий реализации риска, баллы по 10-балльной шкале; k_a – корректирующий коэффициент, учитывающий влияние возраста на тяжесть последствий реализации риска.

Ориентировочные значения корректирующего коэффициента в этом случае можно применить из таблицы 4. В итоге индекс профессионального риска падения при выходе из кабины трактора составляет: $[2/(0,8 \cdot 0,6)] \cdot (3/0,6) \cdot (4/0,6) = 138$.

В соответствии с таблицей 1 риск является значительным.

Без учета корректирующих коэффициентов индекс профессионального риска имел бы значение $2 \cdot 3 \cdot 4 = 24$ (умеренный риск).

Таким образом, введение корректирующих коэффициентов позволит повысить внимание организаторов предприятий по отношению к работникам, которые трудятся в неблагоприятных условиях, повышающих их утомляемость, а по отношению к трактористам-машинистам «нового» предпенсионного возраста – тем более.

Таблица 3

Корректирующий коэффициент теплового влияния

Table 3

Correction factor of the thermal effect

Температура, °С	14	18	20	24	26	28	30
Корректирующий показатель, k_t	0,45	0,6	0,8	1,0	0,8	0,6	0,45

Таблица 4

Корректирующий коэффициент влияния возраста

Table 4

Age correction factor

Возраст, лет	40	45	50	55	60	65
Корректирующий показатель, k_r	2	1,1	1,0	0,8	0,6	0,55

Выводы

В результате выполненного анализа показан ряд известных, но неучитываемых факторов трудового процесса и рабочей среды: например, шум и температура на рабочем месте тракториста-машиниста, повышающих утомляемость, и как следствие – риск несчастных случаев. Учет этих факторов может быть положен в основу концепции по совершенствованию методов оценки профессионального риска.

Список источников

1. Junkes V.H. et al. Occupational risks of work in the agricultural sector: a systematic literature review. *Production*. 2024;34(2): e20230042. <https://doi.org/10.1590/0103-6513.20230042>
2. Широков Ю.А. Анализ возможностей по управлению себестоимостью продукции растениеводства // Аграрная Россия. 2020. № 2. С. 32-39. <https://doi.org/10.30906/1999-5636-2020-2-32-39>
3. Broder J.F., Tucker E. Risk analysis and the security survey. URL: https://booksite.elsevier.com/samplechapters/9780123822338/Front_Matter.pdf <https://doi.org/10.1016/C2009-0-63855-1> (дата обращения: 22.02.2020)
4. Shirokov Y., Tikhnenko V. Analysis of environmental problems of crop production and ways to solve them. *E3S Web of Conferences*. 14th International Scientific and Practical Conference on State and Prospects for the Development of Agribusiness, INTERAGROMASH 2021. Rostov-on-Don, 2021. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202127301025>
5. Cordova-Pozo K., Rouwette E.A.J.A. Types of scenario planning and their effectiveness: A review of reviews. *Futures*. 2023;149:103153. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2023.103153>
6. Король Е.А., Дегаяев Е.Н. Анализ эффективности затрат на мероприятия по охране труда // Вестник МГСУ. 2024. № 19 (1). С. 67-76. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2024.1.67-76>
7. Silva J.M.N., Bispo L.G.M., Leite W.K.S. et al. Assessing the link between occupational risk factors, work-related musculoskeletal disorders and quality of work life: An analysis using PLS-SEM. *International Journal of Industrial Ergonomics*. 2024;104(4):103658. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2024.103658>
8. Wong I., Swanson N. Approaches to managing work-related fatigue to meet the needs of American workers and employers. *Am J Ind Med*. 2022;65(11):827-831. <https://doi.org/10.1002/ajim.23402>
9. Широков Ю.А. Оценка рисков в связи с повышением пенсионного возраста // Охрана труда в промышленности. 2020. № 6. С. 29-34. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2020-6-29-34>
10. Hart J., Hartová V. Development of microclimate in the New Holland T6.165 tractor. *Research in Agricultural Engineering*. 2023;69(4):206-210. <https://doi.org/10.17221/27/2023-RAE>
11. Ružić D., Homa D., Simikić M. et al. Comparative experimental study of microclimate conditions in farm tractor cabs. *Sādhanā*. 2023;258(48). <https://doi.org/10.1007/s12046-023-02306-w>
12. Ferguson J.M. et al. Distribution of working hour characteristics by race, age, gender, and shift schedule among U.S. manufacturing workers. *Chronobiology International*. 2023;40(3):310-323. <https://doi.org/10.1080/07420528.2023.2168200>

Учет названных факторов возможен путем углубления исследований влияния факторов рабочей среды и трудового процесса на утомление работников и снижение внимания, скорости реакций и др., а также введения соответствующих корректирующих коэффициентов. Их уточнение должно стать одной из целей дальнейших исследований применительно к различным условиям труда и вредным производственным факторам.

References

1. Junkes V.H. et al. Occupational risks of work in the agricultural sector: a systematic literature review. *Production*. 2024;34(2): e20230042. <https://doi.org/10.1590/0103-6513.20230042>
2. Shirokov Yu.A. Analysis of opportunities to manage the cost of crop production. *Agrarnaya Rossiya*. 2020;2:32-39. (In Russ.) <https://doi.org/10.30906/1999-5636-2020-2-32-39>
3. Broder J.F., Tucker E. Risk analysis and the security survey. URL: https://booksite.elsevier.com/samplechapters/9780123822338/Front_Matter.pdf <https://doi.org/10.1016/C2009-0-63855-1> (дата обращения: 22.02.2020).
4. Shirokov Y., Tikhnenko V. Analysis of environmental problems of crop production and ways to solve them. *E3S Web of Conferences*. 14th International Scientific and Practical Conference on State and Prospects for the Development of Agribusiness, INTERAGROMASH 2021. Rostov-on-Don, 2021. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202127301025>
5. Cordova-Pozo K., Rouwette E.A.J.A. Types of scenario planning and their effectiveness: A review of reviews. *Futures*. 2023;149:103153. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2023.103153>
6. Korol' E.A., Degaev E.N. Cost-effectiveness analysis of labour protection measures. *Vestnik MGSU*. 2024;19(1):67-76. (In Russ.) <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2024.1.67-76>
7. Silva J.M.N., Bispo L.G.M., Leite W.K.S. et al. Assessing the link between occupational risk factors, work-related musculoskeletal disorders and quality of work life: An analysis using PLS-SEM. *International Journal of Industrial Ergonomics*. 2024;104(4):103658. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2024.103658>
8. Wong I., Swanson N. Approaches to managing work-related fatigue to meet the needs of American workers and employers. *Am J Ind Med*. 2022;65(11):827-831. <https://doi.org/10.1002/ajim.23402>
9. Shirokov Yu.A. Risk assessment in the field of occupational safety in connection with a retirement-age increase. *Occupational Safety in Industry*. 2020;6:29-34. (In Russ.) <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2020-6-29-34>
10. Hart J., Hartová V. Development of microclimate in the New Holland T6.165 tractor. *Research in Agricultural Engineering*. 2023;69(4):206-210. <https://doi.org/10.17221/27/2023-RAE>
11. Ružić D., Homa D., Simikić M. et al. Comparative experimental study of microclimate conditions in farm tractor cabs. *Sādhanā*. 2023;258(48). <https://doi.org/10.1007/s12046-023-02306-w>
12. Ferguson J.M. et al. Distribution of working hour characteristics by race, age, gender, and shift schedule among U.S. manufacturing workers. *Chronobiology International*. 2023;40(3):310-323. <https://doi.org/10.1080/07420528.2023.2168200>

13. Barač Željko et al. Noise in the cabin of agricultural tractors. *Tehniski vjesnik. Technical Gazette*. 2018;25(6):1611-1615. <https://doi.org/10.17559/TV-20170223093448>

14. Han S. et al. Ontology-based noise source identification and key feature selection: A case study on tractor cab. *Shock and Vibration*. 2019;1:1-14. <https://doi.org/10.1155/2019/6572740>

Информация об авторах

¹ Широков Юрий Александрович, д-р техн. наук, профессор; shirokov001@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5196-7447>; SPIN-код: 4709-9965

² Егоров Роман Николаевич, канд. техн. наук, доцент; egorov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8483-9692>; SPIN-код: 7265-9727

³ Мочунова Наталья Александровна, канд. техн. наук, доцент; mochunova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9131-4472>; SPIN-код: 7194-0201

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

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

Вклад авторов:

Широков Ю.А. – концептуализация, методология, руководство исследованиями;

Егоров Р.Н. – верификация данных, формальный анализ, проведение исследований;

Мочунова Н.А. – проведение исследований, администрирование данных, создание черновика рукописи;

Митягин Г.Е. – создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 18.05.2025, после рецензирования и доработки 13.01.2026; принята к публикации 19.01.2026

13. Barač Željko et al. Noise in the cabin of agricultural tractors. *Tehniski vjesnik. Technical Gazette*. 2018;25(6):1611-1615. <https://doi.org/10.17559/TV-20170223093448>

14. Han S. et al. Ontology-based noise source identification and key feature selection: A case study on tractor cab. *Shock and Vibration*. 2019;1:1-14. <https://doi.org/10.1155/2019/6572740>

Author Information

Yuri A. Shirokov¹, DSc (Eng), Professor, shirokov001@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5196-7447>; ResearcherID: AAE-5952-2022; Scopus Author ID: 57218279205

Roman N. Egorov², CSc (Eng), egorov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8483-9692>;

Natalia A. Mochunova³, CSc (Eng), Associate Professor; mochunova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9131-4472>; Scopus Author ID: 57321699300

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

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

Author Contribution

Yu.A. Shirokov – conceptualization, methodology, research supervision;

R.N. Egorov – data verification, formal analysis, investigation;

N.A. Mochunova – investigation, data curation, writing – original draft;

G.E. Mityagin – writing – manuscript review and editing.

Conflict of interests

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

Received 18.05.2025; Revised 13.01.2026; Accepted 19.01.2026

ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕРВИС В АПК

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 658.562.3

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-1-73-79>

Оценка точности и достоверности результатов приемо-сдаточных испытаний двигателей ЗМЗ

О.А. Леонов¹, Н.Ж. Шкаруба²✉, Ю.Г. Вергазова³, Д.О. Леонов⁴^{1,2,3,4} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия¹ oaleonov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8469-8052>² shkaruba@rgau-msha.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-2770-8442>³ vergazova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7564-7656>⁴ dimonl5@ya.ru

Аннотация. Точность и достоверность результатов измерений контролируемых параметров влияют на качество отремонтированного двигателя. В нормативных документах ГОСТ 10448-2014 «Двигатели внутреннего сгорания поршневые», ГОСТ 14846-2020 «Двигатели автомобильные. Методы стендовых испытаний» отсутствуют требования к допустимой погрешности косвенного измерения мощности двигателя. Целью исследований является разработка рекомендаций по метрологическому обеспечению заданной достоверности измерительной информации, получаемой на этапе приемо-сдаточных испытаний отремонтированных двигателей. На основании теории вероятности выведена формула расчета погрешности измерения мощности, рассчитана допустимая погрешность измерения мощности отремонтированных двигателей для различных моделей ЗМЗ; проведен сравнительный анализ расчетного значения допустимой погрешности измерения мощности двигателей ЗМЗ и реальной погрешности измерения мощности при обкатке на стендах КИ-5274, КИ-5540М, КИ-5541М, КИ-542М, КИ-2118А ГОСНИТИ. Установлено, что погрешность измерения мощности не превышает предельную погрешность, допускаемую ГОСТом. Для повышения достоверности результатов контроля мощности разработаны рекомендации по расчету приемочных границ со смещением относительно номинального значения мощности. Рассчитаны предельные погрешности измерения мощности различных моделей двигателей ЗМЗ и приемо-сдаточные границы в зависимости от требуемой достоверности. Применение методики повысит качество измерений, достоверность результатов контроля на этапе приемо-сдаточных испытаний отремонтированных двигателей.

Ключевые слова: погрешность измерения мощности; приемо-сдаточные испытания; приемо-сдаточные границы; косвенные измерения, качество измерений; допустимая погрешность; предельная погрешность

Для цитирования: Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Вергазова Ю.Г., Леонов Д.О. Оценка точности и достоверности результатов приемо-сдаточных испытаний двигателей ЗМЗ // *Агроинженерия*. 2026. Т. 28, № 1. С. 73-79. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-1-73-79>

ORIGINAL ARTICLE

Evaluation of the accuracy and reliability of the acceptance test results for ZMZ engines

O.A. Leonov¹, N.Zh. Shkaruba²✉, Yu.G. Vergazova³, D.O. Leonov⁴^{1,2,3,4} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia¹ oaleonov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8469-8052>² shkaruba@rgau-msha.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-2770-8442>³ vergazova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7564-7656>⁴ dimonl5@ya.ru

Abstract. The accuracy and reliability of measurement results for controlled parameters are essential for ensuring the quality of engine repairs. However, current standards, such as GOST 10448-2014 (“Piston Internal Combustion Engines”) and GOST 14846-2020 (“Automobile Engines: Bench Test Methods”), do not specify requirements

for the permissible error in the indirect measurement of engine power. This study aims to develop metrological recommendations to achieve specified levels of reliability for measurement data obtained during the acceptance testing of repaired engines. Using probability theory, the authors derived a formula to calculate power measurement errors and established permissible error limits for various ZMZ engine models. A comparative analysis was performed to compare these calculated limits with the actual errors observed during running-in tests on GOSNITI test benches (models KI-5274, KI-5540M, KI-5541M, KI-542M, and KI-2118A). The results indicate that the actual measurement errors remain within the calculated permissible range (derived from the GOST-based methodology). To enhance the reliability of power control, the authors developed recommendations for calculating acceptance limits with an offset relative to the nominal power value. Permissible error margins and acceptance limits were determined for various ZMZ engine models based on the required reliability levels. The application of this methodology will improve measurement quality and the overall reliability of control results during the acceptance testing of repaired engines.

Keywords: power measurement error; acceptance tests; acceptance limits; indirect measurements; quality of measurements; permissible error; maximum error

For citation: Leonov O.A., Shkaruba N.Zh., Vergazova Yu.G., Leonov D.O. Evaluation of the accuracy and reliability of the acceptance test results for ZMZ engines. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(1):73-79 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-1-73-79>

Введение

Качество работ по ремонту двигателей внутреннего сгорания оценивается во время проведения испытаний. При этом главным параметром контроля является мощность – косвенно измеряемая величина.

Результаты измерений в зависимости от их вида обрабатываются в соответствии с принятыми алгоритмами и стандартами. Погрешность косвенно измеряемой величины зависит от многих факторов [1, 2]. Наиболее существенными из них являются наличие функциональной зависимости между величиной, подлежащей косвенному определению, и непосредственно измеряемой величиной, и наличие погрешности средства измерений [3, 4]. В некоторых случаях для оценки погрешностей соответствующих результатов можно использовать формулы для оценок абсолютной и относительной погрешностей без предварительной обработки результатов прямых измерений [5-7].

Доказано, что снижения погрешности косвенных измерений можно достигнуть в результате правильного выбора структурной схемы, пределов измерений и способов нормирования [8].

Приемо-сдаточные испытания проводят для контроля качества капитального ремонта двигателей. При этом контролируют следующие показатели: максимально и минимально устойчивую частоту вращения холостого хода; давление масла в главной масляной магистрали; мощность и расход топлива при номинальной частоте вращения и положении органов управления (рычаг) регулятором, соответствующем полной подаче топлива. Допускаемые погрешности основных контролируемых параметров двигателей при приемо-сдаточных испытаниях установлены

в ГОСТ 10448-2014¹, ГОСТ 14846-2020², однако в этих документах отсутствуют требования к допускаемой погрешности измерения мощности двигателя. При нормировании допускаемой погрешности измерения мощности необходимо учитывать, что контролируемая величина – мощность двигателя – является косвенно измеряемой. От точности и достоверности получаемой измерительной информации зависит заключение о качестве отремонтированного двигателя.

Косвенные измерения широко используются при ремонте двигателей для контроля различных величин [9], и в каждом случае возникает вопрос о нормировании допускаемой погрешности измерения и о выборе средств измерений [10]. В связи с этим актуальным вопросом является разработка методики нормирования погрешности измерения при приемо-сдаточных испытаниях отремонтированных двигателей.

Цель исследований: оценка точности косвенно измеряемой величины – мощности двигателя – и разработка рекомендаций для достижения заданной достоверности измерительной информации на этапе приемо-сдаточных испытаний отремонтированных двигателей ЗМЗ.

Материалы и методы

Для разработки оценки точности косвенно измеряемой величины – мощности двигателя – на этапе

¹ГОСТ 10448-2014. Двигатели внутреннего сгорания поршневые: введ. 14 ноября 2014 г. М.: Изд-во Стандартиформ, 2015. 15 с.

²ГОСТ 14846-2020. Двигатели автомобильные. Методы стендовых испытаний: введ. 30 октября 2020 г. М.: Изд-во Стандартиформ, 2020. 90 с.

приемо-сдаточных испытаний применили теорию вероятности и математической статистики. Результаты косвенного измерения и погрешность измерения (мощности двигателя) рассматривали как случайные величины, связанные с измеряемыми значениями (крутящий момент, частота вращения) нелинейной функциональной зависимостью.

Результаты и их обсуждение

Мощность двигателей относится к косвенно измеряемым величинам [11]. Для нахождения косвенной величины проводят измерения других величин, связанных с искомой известной функциональной зависимостью. В нашем случае при измерении мощности зависимость будет иметь вид, кВт:

$$Ne = \frac{M_k \cdot n}{9550}, \quad (1)$$

где M_k – крутящий момент, Н·м; n – частота вращения, мин⁻¹.

В нормативных документах, ГОСТ 10448-2014³, ГОСТ 14846-2020⁴ погрешности измерений контролируемых параметров нормируются следующим образом (табл. 1).

Обработка результатов косвенных измерений имеет ряд существенных отличий и проводится в соответствии с МИ 2083-90 «ГСИ. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей». Обработка результатов косвенных измерений при нелинейной зависимости основана на разложении в ряд Тейлора нелинейных функций [12, 13], связывающих искомую величину с результатами прямых измерений других величин для учета при представлении результатов косвенных измерений. Разложение в ряд Тейлора нелинейных функций имеет особенности, которые необходимо учитывать при представлении результатов косвенных измерений [14]. Таким образом, погрешность результата косвенного измерения зависит от погрешности применяемых средств измерений аргументов,

входящих в формулу (1). Погрешность средств измерений аргументов можно рассматривать как неисключенную систематическую погрешность, заданную своими границами $\pm \Delta x_i$. Доверительные границы неисключенной систематической ($\pm \theta_p$) погрешности результата косвенного измерения при нелинейной зависимости будут определяться по формуле:

$$\pm \theta_p = \pm k \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \Delta x_i^2}, \quad (2)$$

где $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ – частная производная функции f от i -го аргумента; Δx_i – погрешность измерения i -го аргумента, входящего в уравнение связи с искомой величиной; m – количество аргументов, входящих в уравнение связи с искомой величиной (функция f); k – поправочный коэффициент.

Погрешность измерения мощности для зависимости вида (1) в нашем случае будет определяться по формуле:

$$\Delta Ne = \sqrt{\left(\frac{\partial Ne}{\partial M_k} \right)^2 \cdot \Delta M_k^2 + \left(\frac{\partial Ne}{\partial n} \right)^2 \cdot \Delta n^2}. \quad (3)$$

Рассмотрим нормирование погрешности измерения приемо-сдаточных испытаний на примере типовых моделей базовых модификаций двигателей Заволжского моторного завода (ЗМЗ), которые часто применяются на бортовых автомобилях «Газель» и полноприводных УАЗах, широко используемых в сельском хозяйстве. Характеристики рассматриваемых моделей двигателей представлены в таблице 2.

Подставив в формулу (3) номинальные значения крутящего момента, частоты вращения (табл. 2) и их допускаемые погрешности измерения (ГОСТ 10448-2014, ГОСТ 14846-2020), определим допускаемую погрешность измерения мощности отремонтированных двигателей. Полученные значения представлены в таблице 3.

Таблица 1

Допускаемые погрешности измерений контролируемых параметров двигателей внутреннего сгорания

Table 1

Permissible errors in measuring the controlled parameters of internal combustion engines

Контролируемая величина	Относительная погрешность, %	
	ГОСТ 10448-2014	ГОСТ 14846-2020
Крутящий момент, M_k , Н·м	±1,5	±2,0
Частота вращения, n , мин ⁻¹	±1,0	±2,0

³ГОСТ 10448-2014. Двигатели внутреннего сгорания поршневые: введ. 14 ноября 2014 г. М.: Изд-во Стандартиформ, 2015. 15 с.

⁴ГОСТ 14846-2020. Двигатели автомобильные. Методы стендовых испытаний: введ. 30 октября 2020 г. М.: Изд-во Стандартиформ, 2020. 90 с.

Таблица 2

Значения основных контролируемых показателей двигателей при испытаниях

Table 2

Values of the main controlled engine parameters during testing

Контролируемая величина	Марка двигателя			
	Семейство ЗМЗ V-8		Семейство ЗМЗ-406	
	ЗМЗ-5231.10	ЗМЗ-5245.10	ЗМЗ-409051.10	ЗМЗ-40524.10
Номинальная частота вращения $n_{ном}$, мин ⁻¹	3200	3200	5000±100	5000±100
Крутящий момент M_k , Н·м	272,2	303,8	224,6	196,9
Номинальная мощность (не менее), N_e , кВт	91,2	101,8	117,6	103,1

Таблица 3

Расчетные значения допускаемых абсолютных погрешностей измерения контролируемых параметров двигателей

Table 3

Estimated values of permissible absolute errors of measuring the controlled parameters of engines

Контролируемая величина	ЗМЗ V-8		ЗМЗ-406	
	ЗМЗ-5231.10	ЗМЗ-5245.10	ЗМЗ-409051.10	ЗМЗ-40524.10
	Допускаемая абсолютная погрешность			
ГОСТ 10448-2014				
Частота вращения, $n_{ном}$, мин ⁻¹	32,0	48,0	75,0	75,0
Крутящий момент, M_k , Н · м	4,1	4,6	3,4	3,0
Мощность Ne , кВт	1,6	1,8	2,1	1,9
ГОСТ 14846-2020				
Частота вращения $n_{ном}$, мин ⁻¹	64,0	64,0	100,0	100,0
Крутящий момент, M_k , Н · м	5,4	6,1	4,5	3,9
Мощность Ne , кВт	1,8	2,0	2,4	2,1

Реальная погрешность измерения контролируемых параметров зависит от метрологических характеристик используемых обкаточно-тормозных стендов. При выборе стенда для испытаний двигателей из большого разнообразия их модификаций необходимо соблюдать соответствие применяемых средств измерений нормируемой допускаемой погрешности. Для обкатки и испытаний ДВС сельскохозяйственного назначения применяются стенды КИ-5274, КИ-5540М, КИ-5541М, КИ-542М, КИ-2118А ГОСНИТИ. Эти стенды имеют следующие метрологические характеристики:

– погрешность силоизмерительного механизма $\Delta P = \pm 0,5$ кг (или при переводе в Н·м при длине рычага $l = 0,716$ м $\Delta M = \pm 3,5$ Н·м);

– погрешность измерения частоты вращения $\Delta n = \pm 1\%$.

Используя формулу (3) и реальные метрологические характеристики, получим расчетные значения предельной погрешности измерения мощности

при обкатке двигателей на вышеуказанных стендах (табл. 4).

Из таблицы 4 следует, что предельные погрешности контролируемых параметров на стендах КИ-5274, КИ-5540М, КИ-5541М, КИ-542М, КИ-2118А ГОСНИТИ соответствуют основному условию выбора средств измерения:

$$\pm \Delta_{lim} \leq \pm \varepsilon, \quad (4)$$

где $\pm \Delta_{lim}$ – предельная погрешность средств измерений; $\pm \varepsilon$ – допускаемая погрешность контролируемой величины.

Таким образом, метрологические характеристики применяемых средств измерений в целом позволяют обеспечить требуемый уровень точности косвенно измеряемой величины – мощности двигателя.

С точки зрения достоверности контролируемой величины – мощности двигателя – следует отметить, что при проведении прямо-сдаточных испытаний мощность контролируется по минимально допустимому значению (не менее),

Таблица 4

Расчетные значения предельной погрешности измерения контролируемых параметров при обкатке двигателей на стендах КИ-5274, КИ-5540М, КИ-5541М, КИ-5542М, КИ-2118А ГОСНИТИ

Table 4

Estimated values of the maximum error in measuring the controlled parameters during engine running-in on the GOSNITI test benches (models KI-5274, KI-5540M, KI-5541M, KI-5542M, and KI-2118A)

Контролируемая величина, единица измерения	ЗМЗ V-8		ЗМЗ-406	
	ЗМЗ-5231.10	ЗМЗ-5245.10	ЗМЗ-409051.10	ЗМЗ-40524.10
	Абсолютная погрешность			
Частота вращения, $n_{ном}$, мин ⁻¹	±2,72	±3,04	±2,25	±2,25
Крутящий момент, M_k , Н·м	±3,50	±3,50	±3,50	±3,50
Мощность, Ne , кВт	±1,24	±1,11	±0,89	±1,02

установленному заводом-изготовителем. При отсутствии двухсторонних приемочных границ и контроля по минимально допустимому значению мощности вероятность того, что испытуемый двигатель будет иметь действительную мощность не меньше минимально допустимой, составит не более 50%, то есть $P\{\theta \geq Ne\} = 0,5$. В соответствии с МИ 2083-90 «ГСИ. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей» при установлении доверительных границ погрешностей результата косвенного измерения обычно принимают вероятность, равную 0,95 или 0,99. Чтобы обеспечить требуемую достоверность результатов косвенного измерения и гарантировать потребителю номинальную мощность, указанную в эксплуатационной документации, необходимо установить приемочные границы для контроля мощности при обкатке и испытании.

Величина сдвига при расчете приемочных границ будет зависеть от требуемой достоверности. Чтобы обеспечить вероятность при контроле номинальной мощности $P\{\theta \geq Ne\} = 95\%$, необходимо сдвинуть приемочные границы в сторону увеличения мощности на $DNe_{p=0,9}/2$; в случае, когда требуется

вероятность $P\{\theta \geq Ne\} = 99\%$, приемочные границы необходимо сдвинуть в сторону увеличения мощности на величину $DNe_{p=0,98}/2$.

$$\Delta Ne_p = k \sqrt{\left(\frac{\partial Ne}{\partial M_k}\right)^2 \cdot \Delta M_k^2 + \left(\frac{\partial Ne}{\partial n}\right)^2 \cdot \Delta n^2}. \quad (5)$$

Чтобы получить доверительный интервал $\pm \Delta Ne_p = 90\%$, в формуле (5) примем поправочный коэффициент $k = 0,95$, а при доверительной вероятности $P = 0,98$ для $\pm \Delta Ne_p = 98\% - k = 1,44$ [10].

Таким образом, новое значение приемочной границы Ne' определим по выражению:

$$Ne' = Ne + \Delta Ne_p / 2. \quad (6)$$

Предельные значения погрешности измерения мощности при прямо-сдаточных испытаниях, рассчитанные по формуле (5), и приемочное значение границ мощности, найденное по формуле (6), для двигателей различных марок в зависимости от требуемой достоверности представлены в таблице 5.

Из таблицы 5 следует, что величина сдвига приемочных границ при контроле мощности зависит от погрешности измерения и требуемой доверительной вероятности.

Таблица 5

Предельная погрешность измерения мощности различных моделей двигателя ЗМЗ и прямо-сдаточные границы в зависимости от требуемой достоверности

Table 5

Maximum error in measuring the power of various ZMZ engine models and the acceptance limits, depending on the required accuracy

Марка двигателя ЗМЗ	Доверительная вероятность			
	0,95	0,99	0,95	0,99
	Величина сдвига приемочной границы мощности, Ne , кВт		Приемочные границы мощности Ne' , не менее, кВт	
5231.10	0,59	0,89	91,79	92,09
5245.10	0,53	0,80	102,33	102,6
409051.10	0,43	0,65	118,03	118,25
40524.10	0,49	0,74	103,59	103,84

Выводы

Разработаны рекомендации для достижения заданной достоверности измерительной информации на этапе приемо-сдаточных испытаний отремонтированных двигателей.

Установлено, что при приемо-сдаточных испытаниях двигателей контроль мощности необходимо осуществлять по смещенным приемочным границам

Список источников

1. Прокопов А.В. Алгоритм обоснования уравнения измерения и оценки методической погрешности (неопределенности) результата измерений при косвенных измерениях // Измерительная техника. 2005. № 4. С. 25-29. EDN: PEHEEF
2. Сирая Т.Н. Методы обработки данных при измерениях и метрологические модели // Измерительная техника. 2018. № 1. С. 9-14. EDN: YNUFXD
3. Заикин С.Ф., Перминов Б.А. Косвенный метод измерения крутящего момента // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2011. № 7. С. 46-48. EDN: SMYNVL
4. Соболев В.И. Косвенные измерения при вероятностной зависимости между непосредственно измеряемыми и косвенно определяемыми величинами // Измерительная техника. 2006. № 7. С. 17-20. EDN: MUZKXJ
5. Диденко В.И. Косвенные измерения при различном нормировании пределов допускаемых погрешностей технических средств // Метрология. 2017. № 4. С. 3-14. EDN: ZWBAKV
6. Искендерзаде Э.Б., Сулейманова Е.Д., Велиев Г.С. Метод косвенных двусоставных измерений для контроля производственных показателей. Контроль. Диагностика. 2023. Т. 26, № 1 (295). С. 30-32. EDN: IKVCXJ
7. Еремин Е.В. Критерии эффективных оценок результатов косвенных измерений некоторых величин // Приборы. 2022. № 11 (269). С. 44-49. EDN: FHGVRK
8. Еремин Е.В. Метод оценки результата и показателей точности косвенных измерений в виде частного // Измерительная техника. 2025. Т. 74, № 2. С. 28-36. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2025-2-28-36>
9. Ерохин М.Н., Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж. и др. Нормирование допускаемой погрешности измерения массы при контроле деталей шатунно-поршневой группы // Вестник машиностроения. 2021. № 9. С. 40-44. EDN: KWUJYJ
10. Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж. Нормирование погрешности косвенных измерений при приемо-сдаточных испытаниях двигателей // Измерительная техника. 2022. № 8. С. 23-27. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-8-23-27>
11. Семенов А.Д., Волков С.В., Исаев С.Г. и др. Косвенное измерение частоты вращения ротора асинхронного двигателя // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 4 (42). С. 64-70. EDN: GECFNX
12. Еремин Е.В. О корректности представления значений величин и показателей точности результатов косвенных измерений // Приборы. 2019. № 9. С. 46-54. EDN: WNBKJK
13. Попов А.А., Косырева О.Н., Добротин С.А. Оценка неопределенности результатов косвенных измерений по результатам системного анализа остаточного члена формулы Тейлора // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2023. № 2 (141). С. 14-29. EDN: IXKMJI
14. Тумашик Г.А., Хазова И.А., Дудин А.А. и др. Оценка практической применимости метода косвенного контроля круговой формы корпуса // Труды Крыловского государственного научного центра. 2025. № 2 (412). С. 56-64. EDN: DPFORA

в сторону увеличения мощности на величину $DNe_{P=0,9}$ при $P\{\theta \geq Ne\} = 95\%$ и на величину $DNe_{P=0,98}$ при $P\{\theta \geq Ne\} = 99\%$.

Применение методики повысит качество измерений, достоверность результатов контроля на этапе приемо-сдаточных испытаний отремонтированных двигателей.

References

1. Prokopov A.V. An algorithm for deriving the measurement equation and estimating the methodological error (uncertainty) in the result for indirect measurements. *Izmeritel'naya Tekhnika*. 2005;4:25-29. (In Russ.)
2. Siraya T.N. Methods of data processing in measurements and metrological models. *Izmeritel'naya Tekhnika*. 2018;1:9-14. (In Russ.)
3. Zaikin S.F., Perminov B.A. Indirect method of measurement of a twisting moment. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol, diagnostika*. 2011;7:46-48. (In Russ.)
4. Sobolev V.I. Indirect measurements for probability dependence between the directly measured and indirectly defined values. *Izmeritel'naya Tekhnika*. 2006;7:17-20. (In Russ.)
5. Didenko V.I. Indirect measurements with different normalization of the limits of tolerable errors of technical means. *Metrologiya*. 2017;4:3-14. (In Russ.)
6. Iskenderzade E.B., Suleymanova E.D., Veliyev G.S. The method of indirect two-part measurements for the control of production indicators. *Kontrol'. Diagnostika*. 2023;26;1(295):30-32. (In Russ.)
7. Eremin E.V. Criteria for the effective assessment of the results of indirect measurements of certain values. *Pribory*. 2022;11(269):44-49. (In Russ.)
8. Eremin E.V. Method of estimation the result and its accuracy indicators for indirect measurements in the form of a quotient. *Izmeritel'naya Tekhnika*. 2025;74(2):28-36. (In Russ.) <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2025-2-28-36>
9. Erokhin M.N., Leonov O.A., Shkaruba N.Zh. et al. Normalization of the permissible error in measuring the mass when controlling the parts of the connecting rod-piston group. *Vestnik Mashinostroeniya*. 2021;9:40-44. (In Russ.)
10. Leonov O.A., Shkaruba N.Zh. Regulation of the errors of indirect measurements of acceptance and acceptance tests of engines. *Izmeritel'naya Tekhnika*. 2022;8:23-27. (In Russ.) <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-8-23-27>
11. Semenov A.D., Volkov S.V., Isaev S.G. et al. Indirect measurement of the rotor speed of an asynchronous motor. *Measurement. Monitoring. Management Control*. 2022;4(42):64-70. (In Russ.)
12. Eremin E.V., Kosyeva O.N., Dobrotin S.A. On the correctness of presenting the values and accuracy indicators of indirect measurement results. *Pribory*. 2019;9:46-54. (In Russ.)
13. Popov A.A. Estimation of indirect observation uncertainty according to Taylor remainder system analysis. *Trudy NGTU imeni P.E. Alekseeva*. 2023;2(141):14-29. (In Russ.)
14. Tumashik G.A., Khazova I.A., Dudin A.A. et al. Practicability assessment for indirect hull roundness control method. *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2025;2(412):56-64. (In Russ.)

Информация об авторах

- ¹ **Леонов Олег Альбертович**, д-р техн. наук, профессор;
oaleonov@rgau-msha.ru; SPIN-код: 9399-5650,
AuthorID: 367093; <https://orcid.org/0000-0001-8469-8052>
- ² **Шкаруба Нина Жоровна**, д-р техн. наук, профессор;
shkaruba@rgau-msha.ru[✉]; SPIN-код: 4773-0700,
AuthorID: 482487; <https://orcid.org/0000-0002-2770-8442>
- ³ **Вергазова Юлия Геннадьевна**, канд. техн. наук, доцент;
vergazova@rgau-msha.ru; SPIN-код: 1867-1420,
AuthorID: 780919
- ⁴ **Леонов Дмитрий Олегович**, аспирант; dimonl5@ya.ru;
SPIN-код: 2866-7844, AuthorID: 1155681
- ^{1, 2, 3, 4} Российский государственный аграрный университет –
МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434,
Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Вклад авторов

О.А. Леонов – руководство исследованиями, концептуализация;
Н.Ж. Шкаруба – методология, создание окончательной вер-
сии (доработка) рукописи и ее редактирование;
Ю.Г. Вергазова – верификация данных; подготовка начального
варианта текста; формирование выводов исследований;
Д.О. Леонов – проведение исследований, описание результатов.

Конфликт интересов

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

**Статья поступила 24.10.2025, после рецензирования
и доработки 22.01.2026; принята к публикации 26.01.2026**

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
- Yuliya G. Vergazova**³, CSc (Eng), Associate Professor;
vergazova@rgau-msha.ru;
<https://orcid.org/0000-0002-7564-7656>;
Scopus Autor ID: 57210258726;
Researcher ID: AAD-5899-2022
- Dmitry O. Leonov**⁴, postgraduate student, dimonl5@ya.ru;
ScopusAutor ID: 57777954900
- ^{1, 2, 3, 4} Russian StateAgrarian University – Moscow Timiryazev
Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow,
127434, Russia

Author Contribution

O.A. Leonov – research supervision; conceptualization;
N.Zh. Shkaruba – research methodology, writing – review and editing
of the manuscript;
Yu.G. Vergazova – data verification; writing – original draft; con-
clusions;
D.O. Leonov – investigation, 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 24.10.2025; Revised 22.01.2026; Accepted 26.01.2026

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 658.562.6

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-1-80-86>

Обоснование целесообразности замены аналоговых средств измерений цифровыми на ремонтных предприятиях

П.В. Голиницкий^{1✉}, У.Ю. Антонова², Д.А. Пупкова³^{1,2,3} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия¹ gpv@rgau-msha.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0001-7303-1658>² uantonova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0126-3550>³ bogolyubova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0273-2796>

Аннотация. Цифровые средства измерений в сравнении с универсальными (аналоговыми) обладают лучшими метрологическими характеристиками, снижают вероятность ошибки при считывании показаний и позволяют обеспечить их автоматическую регистрацию. Цель исследований – оценка целесообразности замены универсальных средств измерений цифровыми с ограничением снижения предельной погрешности в 1,7...2 раза в условиях ремонтных предприятий. Для проведения исследований отобрали 1000 распределительных валов двигателя ЯМЗ-236 и соответствующие им втулки, что составило 4000 соединений. Размеры опорных шеек распределительного вала имеют первый ремонтный размер $\varnothing 53,7_{-0,105}^{-0,065}$, а сопрягаемые с ними втулки – $\varnothing 54_{+0,03}^{+0,03}$. При контроле опорных шеек распределительного вала вместо рычажной скобы выбран цифровой микрометр Dasqua 4105, а для контроля внутреннего диаметра втулок – цифровой трехточечный нутромер Dasqua 4511. В результате анализа установлено, что замена рычажной скобы на цифровой микрометр привела к совокупному снижению количества неправильно принятых и неправильно забракованных деталей в 1,58 раза. За весь период эксплуатации экономия превысила 2059 тыс. руб. Внедрение цифрового нутромера обеспечило суммарное уменьшение числа неправильно принятых и неправильно забракованных втулок в 2,12 раза, за весь период эксплуатации нутромера экономия превысила 3830 тыс. руб. На основании анализа экономической целесообразности перехода на цифровые измерительные приборы установлено, что наибольшая эффективность достигается при контроле внутренних диаметров втулок цифровым нутромером. Результаты исследований позволяют снизить годовые потери в 1,36 раза при контроле опорных шеек распределительного вала, а экономия за весь срок эксплуатации превысит 2059 тыс. руб., снизит годовые потери при контроле внутреннего диаметра втулок в 1,96 раза, экономия за весь срок эксплуатации составит более 3830 тыс. руб.

Ключевые слова: средства измерений; цифровые средства измерений; вероятность ошибки; цифровой микрометр; нутромер; брак

Для цитирования: Голиницкий П.В., Антонова У.Ю., Пупкова Д.А. Обоснование целесообразности замены аналоговых средств измерений цифровыми на ремонтных предприятиях // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 1. С. 80-86. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-1-80-86>

ORIGINAL ARTICLE

Justification for the feasibility of replacing analog measuring instruments with digital ones at repair enterprises

P.V. Golinitzkiy^{1✉}, U.Yu. Antonova², D.A. Pupkova³^{1,2,3} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia¹ gpv@rgau-msha.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0001-7303-1658>² uantonova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0126-3550>³ bogolyubova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0273-2796>

Abstract. As compared to conventional analog (universal) measuring instruments, digital tools possess superior metrological characteristics, reduce the likelihood of reading errors, and enable automated data registration. The study aims to evaluate the feasibility of replacing analog instruments with digital ones, targeting a reduction in the limit error by a factor of 1.7-2.0 within the context of repair enterprises. The study examined 1,000 camshafts from YaMZ-236 engines and their corresponding bushings, totaling 4,000 connections. The camshaft bearing

journals were of the first undersize (repair size) $\varnothing 53.7_{-0.105}^{-0.065}$ mm, while the mating bushings were $\varnothing 54^{+0.03}$ mm. For the inspection of the camshaft bearing journals, a Dasqua 4105 digital micrometer was selected to replace a lever snap gauge; for the internal diameter of the bushings, a Dasqua 4511 digital three-point internal micrometer (bore gauge) was used. The analysis revealed that replacing the lever snap gauge with a digital micrometer led to a 1.58-fold reduction in the total number of incorrectly accepted and incorrectly rejected parts. Over the entire service life of the tool, the savings exceeded 2,059,000 RUB. The implementation of the digital bore gauge ensured a 2.12-fold total reduction in incorrectly accepted and rejected bushings, with savings exceeding 3,830,000 rubles over the tool's service life. Based on the economic feasibility analysis of the transition to digital instruments, the authors established that the highest efficiency is achieved when inspecting the internal diameters of bushings with a digital bore gauge. The results demonstrate that implementing these digital tools results in a 1.36-fold reduction in annual losses for camshaft journal inspection and a 1.96-fold reduction for the inspection of bushing internal diameters.

Keywords: measuring instruments; digital measuring instruments; probability of error; digital micrometer; bore gauge; defects

For citation: Golinskiy P.V., Antonova U.Yu., Pupkova D.A. Justification for the feasibility of replacing analog measuring instruments with digital ones at repair enterprises. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(1):80-86 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-1-80-86>

Введение

Повышение точности производственных процессов на машиностроительных производствах, обусловленное внедрением нового оборудования и совершенствованием конструкции сборочных единиц в плане реализации новых посадок, шероховатости и отклонений формы и расположения поверхностей, предъявляет повышенные требования в области метрологического обеспечения к предприятиям, осуществляющим техническое обслуживание и ремонт [1].

Особенностью ремонтных предприятий является использование универсального оборудования, позволяющего производить механическую обработку широкой номенклатуры изношенных деталей, что негативно сказывается на стабильности получаемых допусков ремонтных размеров [2]. Данный фактор негативно влияет на прогнозирование послеремонтного ресурса сопряжений. Для улучшения сложившейся ситуации предприятия заменяют оборудование станками с более высоким классом точности – как правило, дорогостоящими и имеющими длительный срок окупаемости [3].

Альтернативным решением, позволяющим повысить стабильность показателей соединения, является снижение вероятности возникновения брака деталей, входящих в соединение, путем совершенствования контрольно-измерительных приборов, замены рекомендуемых (аналоговых) средств измерения (СИ) цифровыми. Данное решение также требует экономических вложений, но может быть компенсировано за счет снижения затрат на исправление брака [4]. Отличительной особенностью ремонтных предприятий является осуществление сплошного контроля в процессе дефектации и перед сборкой соединения,

что повышает привлекательность данного подхода. Помимо этого, для операций дефектации входного и операционного контроля используются универсальные средства измерений, широкая номенклатура которых позволяет выбрать более рациональные, исходя из поставленной цели [5].

В условиях подобных производственных предприятий наблюдается ряд особенностей – таких, как поэлементный контроль и медленный темп проведения измерений, обусловленных отсутствием стабильной загрузки однотипными изделиями. Эти факторы нивелируют преимущества цифровых СИ по сравнению с аналоговыми, что снижает очевидность необходимости их замены [6].

При переходе на цифровые СИ необходимо учитывать их особенности. Материал деталей, из которого изготовлены цифровые измерительные приборы, имеет отличающийся коэффициент температурного расширения, что может приводить к дополнительным погрешностям [7]. Температура измеряемой детали также оказывает более сильное воздействие на цифровой измерительный инструмент, чем на классический, а резкий перепад температуры, например, при попадании охлаждающей жидкости, может привести к выходу из строя их электронных компонентов. Еще одним фактором, оказывающим негативное влияние на цифровое СИ, является ультрафиолетовое излучение, длительное воздействие которого негативным образом может сказываться на состоянии дисплея.

Несмотря на особенности эксплуатации цифровых СИ, они обладают лучшими метрологическими характеристиками, снижают вероятность ошибки при считывании показаний и позволяют обеспечить их автоматическую регистрацию [8].

Поскольку окупаемость прибора напрямую зависит от величины выявленного брака, возникает «соблазн» применения чрезмерно точных СИ [9]. Но данная стратегия ошибочна, поскольку может привести к резкому снижению годных деталей и перегрузки производства исправимым браком, поэтому стоит ограничить снижение предельной погрешности в 1,7...2 раза. При введении данного ограничения остается неясным вопрос окупаемости цифровых СИ с учетом затрат на их эксплуатацию в условиях ремонтного предприятия.

Цель исследований: оценить целесообразность замены рекомендуемых средств измерений цифровыми с ограничением снижения предельной погрешности в 1,7...2 раза в условиях ремонтных предприятий.

Материалы и методы

Оценить эффективность сплошного контроля при поступлении деталей в ремонт затруднительно, поскольку износы имеют относительно случайную величину как вдоль оси вращения, так и по длине, дополняемые отклонениями от формы [10]. В этих условиях наибольшее значение имеет квалификация персонала, проводящего дефектацию, а не характеристики СИ. В связи с этим для проведения оценки выбраны распределительные валы и втулки, прошедшие обработку под первый ремонтный размер.

Расчет экономической эффективности от замены аналоговых СИ цифровыми производился по адаптированной для ремонтных предприятий методике независимо от объемов производства.

Потери от исправимого брака определяются как

$$П_{ИБ} = З_{ИБ} \cdot P_{ИБ} \cdot B, \quad (1)$$

где $З_{ИБ}$ – затраты на исправление брака, руб.; $P_{ИБ}$ – вероятность появления исправимого брака, %; B – количество деталей, шт.

Выражение для определения потерь от неисправимого брака –

$$П_{НБ} = (C_d - C_n) \cdot P_{НБ} \cdot B, \quad (2)$$

где C_d – стоимость детали, руб.; C_n – стоимость лома, руб.; $P_{НБ}$ – вероятность появления неисправимого брака, %.

Уменьшение экономических потерь, связанных с сокращением неправильно принятых и неправильно забракованных деталей для неправильно забракованных деталей, –

$$\Xi_n = N \cdot C_d \cdot (n_{(1)} - n_{(2)}) \cdot 0,01, \quad (3)$$

где N – число измеренных деталей, шт.; $n_{(1)}$ и $n_{(2)}$ – количество неправильно забракованных деталей для менее и более точного средства измерения, %.

Для неправильно принятых деталей формула будет иметь вид:

$$\Xi_m = N \cdot З_{ИБ} \cdot (m_{(1)} - m_{(2)}) \cdot 0,01, \quad (4)$$

где $m_{(1)}$ и $m_{(2)}$ – количество неправильно принятых деталей для менее и более точного средства измерения, %.

Потери от неправильно принятых и неправильно забракованных деталей для каждого средства измерения –

$$П_{ПИ} = N \cdot (n \cdot C_d + m \cdot З_{ИБ}) \cdot 0,01. \quad (5)$$

Годовые потери, вызванные использованием средства измерения при контроле параметра, определяются как

$$П_{СИ} = K \cdot (R_p + E_n) + И + П_{ПИ}, \quad (6)$$

где K – затраты на приобретение и введение в эксплуатацию средства измерения и обучение персонала, руб.; R_p – норма реновации; E_n – норматив приведения единовременных затрат; $И$ – годовые издержки на эксплуатацию средства измерения, руб.

Потери на контроль при производстве определяются через сумму потерь:

$$П_K = П_{СИ} + П_{ИБ} + П_{НБ}. \quad (7)$$

Экономия за весь срок эксплуатации более точного средства измерения определяется по формуле:

$$\Xi = \frac{П_{СИА} \cdot \frac{T_{СИЦ}}{T_{СИА}} - П_{СИЦ}}{R_p + E_n}, \quad (8)$$

где $П_{СИА}$ и $П_{СИЦ}$ – годовые потери, соответственно вызванные использованием аналогового- и цифрового средства измерения, руб.; $T_{СИА}$ и $T_{СИЦ}$ – срок службы соответствующего аналогового- и цифрового средства измерения, лет.

Экономическую оценку проводили для 1000 шт. распределительных валов двигателя ЯМЗ-236, прошедших обработку под первый ремонтный размер, и соответствующих им втулок, что составило 4000 соединений в год. Цифровые средства измерений выбирали, исходя из диаметра опорных шеек распределительного вала $53,7_{-0,065}^{+0,065}$ мм и внутреннего диаметра втулок $54_{-0,03}^{+0,03}$ мм, с учетом ограничения снижения предельной погрешности в 1,7...2 раза.

При переходе на цифровые СИ возникает ряд вопросов, связанных с правильностью выбора измерительного инструмента. Наиболее сложной задачей при проведении контрольно-измерительных операций является измерение диаметров цилиндрических отверстий деталей. Среди универсальных СИ, измеряющих отверстия, можно выделить двухточечные и трехточечные нутромеры.

Двухточечные нутромеры могут устанавливаться в различных угловых положениях, что позволяет измерять отверстия овальной формы.

Трехточечные нутромеры обеспечивают хорошую повторяемость результатов (сходимость и воспроизводимость). Особенности, заложенные в его конструкции, позволяют самоцентрироваться внутри отверстия благодаря наличию трех измерительных поверхностей, что упрощает его эксплуатацию и уменьшает вероятность возникновения ошибок измерения. Трехточечный нутромер благодаря выполнению измерений в различных угловых положениях позволяет обнаружить огранку. Данный вид нутромеров получил широкое распространение при измерении глубоких отверстий деталей благодаря возможности использования специальных удлинителей, а установка цифровой микрометрической головки еще больше расширяет их возможности.

Поскольку втулки, обработанные под первый ремонтный размер, лишены следов износа и, как следствие, овальности, для контроля внутреннего диаметра был выбран цифровой трехточечный нутромер Dasqua 4511, обеспечивающий снижение предельной погрешности в 2 раза.

При переходе на цифровые СИ не всегда можно найти прямой аналог рекомендуемого средства измерения. Например, при дефектации распределительного вала широко распространенного двигателя ЯМЗ-236 для контроля опорных шеек рекомендуют использовать рычажную скобу, но она отсутствует в каталогах цифровых СИ ведущих производителей измерительного оборудования. Ее заменой может служить цифровой рычажный микрометр. В качестве цифровых средств измерений для контроля опорных шеек выбран цифровой рычажный микрометр Dasqua 4105, позволяющий снизить предельную погрешность в 1,75 раза.

Результаты и их обсуждение

Исходные данные и результаты произведенного расчета оценки экономической целесообразности замены аналоговых средств измерений цифровыми согласно представленной методике при контроле опорных шеек распределительного вала двигателя ЯМЗ-236, обработанных под первый ремонтный размер, приведены в таблице 1.

Анализ данных, представленных в таблице 1, демонстрирует, что снижение погрешности в 1,75 раза

Таблица 1

Исходные данные и результаты расчета экономической целесообразности применения цифрового средства измерения при контроле опорных шеек распределительного вала

Table 1

Initial data and calculated indicators of the economic feasibility of using a digital measuring device when monitoring camshaft bearing journals

Показатели	Средство измерения	
	Цифровой микрометр Dasqua 4105	Скоба рычажная CP-75
Контролируемый размер, мм	53,7 ^{-0,065} _{-0,105}	
Предельная погрешность СИ, мкм	±2	±3,5
СКО погрешности измерения, мкм	1	1,75
Коэффициент точности измерения, %	2,50	4,58
Количество неправильно принятых опорных шеек от количества годных, %	0,4	0,8
Количество неправильно забракованных опорных шеек от количества годных, %	0,8	1,1
Вероятность появления исправимого брака	0,0212	
Вероятность того, что деталь будет являться неисправимым браком	0,00038	
Уменьшение экономических потерь, связанных с сокращением неправильно принятых деталей, руб.	81600	
Уменьшение экономических потерь, связанных с сокращением неправильно принятых деталей, руб.	1529,60	
Потери от исправимого брака, руб.	8106,93	
Потери от неисправимого брака, руб.	9414,88	
Потери от неправильно принятых и неправильно забракованных деталей, руб.	205689,60	283779,20
Годовые потери, вызванные использованием средства измерения при контроле параметра, руб.	230715,92	313079,20
Потери на контроль при производстве, руб.	248237,73	330601,01
Экономия за весь срок эксплуатации цифрового средства измерения, руб.	2059082	

при использовании цифрового микрометра привело к уменьшению количества неправильно принятых деталей в 2 раза, неправильно забракованных деталей – в 1,37 раза. Совокупное снижение неправильно принятых и неправильно забракованных деталей составило 1,58 раза. Это указывает на отсутствие прямой пропорциональной зависимости между уровнем брака и точностью измерений, что подтверждает необходимость детальной оценки экономических потерь, связанных с заменой средств измерений.

При замене рычажной скобы на цифровой микрометр произошло снижение потерь от неправильно принятых и неправильно забракованных деталей в 1,38 раза, годовых потерь от использования СИ в 1,36 раза, на контроль при производстве – в 1,33 раза, экономия за весь срок эксплуатации составила более 2059 тыс. руб.

Исходные данные и результаты оценки экономической целесообразности применения цифрового средства измерения внутреннего диаметра втулок распределительного вала двигателя

ЯМЗ-236 при контроле результатов обработки под первый ремонтный размер представлены в таблице 2.

На основании данных, представленных в таблице 2, можно сделать вывод о том, что замена нутромера на цифровой позволила сократить погрешности измерительных средств в 2 раза. Количество втулок, неправильно принятых, уменьшилось в 1,75 раза, а количество неправильно забракованных втулок – в 2,29 раза. Как и в предыдущем случае, не наблюдается прямо пропорционального снижения количества забракованных деталей в соответствии с повышением точности СИ.

Применение цифрового СИ позволило снизить потери от неправильно принятых и неправильно забракованных деталей в 2,27 раза, годовые потери, вызванные использованием средства измерения при контроле параметра, при этом снизились в 1,96 раза, потери на контроль при производстве уменьшились в 1,47 раза, экономия за весь срок эксплуатации составила более 3830 тыс. руб.

Таблица 2

Исходные данные и результаты расчета экономической целесообразности применения цифрового средства измерения при контроле внутреннего диаметра втулок распределительного вала

Table 2

Initial data and calculated indicators of the economic feasibility of using a digital measuring device when monitoring the internal diameter of camshaft bushings

Показатели	Средство измерения	
	Цифровой нутромер Dasqua 4511	Нутромер НИИ 50-100
Контролируемый размер, мм	54 ^{+0,03}	
Предельная погрешность СИ, мкм	±5	±10
СКО погрешности измерения, мкм	2,5	5
Коэффициент точности измерения, %	8,3	16,7
Количество неправильно принятых опорных шеек от количества годных, %	1,6	2,8
Количество неправильно забракованных опорных шеек от количества годных, %	3,4	7,8
Вероятность появления исправимого брака	0,0274	
Вероятность того, что деталь будет являться неисправимым браком	0,0465	
Уменьшение экономических потерь, связанных с сокращением неправильно принятых деталей, руб.	220000	
Уменьшение экономических потерь, связанных с сокращением неправильно принятых деталей, руб.	5594,40	
Потери от исправимого брака, руб.	12773,88	
Потери от неисправимого брака, руб.	205716	
Потери от неправильно принятых и неправильно забракованных деталей, руб.	177459,20	403053,60
Годовые потери, вызванные использованием средства измерения при контроле параметра, руб.	210905,74	413934,90
Потери на контроль при производстве, руб.	429395,62	632424,78
Экономия за весь срок эксплуатации цифрового средства измерения, руб.	3830738,87	

Выполненная оценка показала отсутствие прямой пропорциональной зависимости между величиной брака и экономическими потерями, большое влияние на которые оказывают затраты на его устранение.

Наиболее сложной операцией с точки зрения получения требуемого уровня точности является контроль внутренних поверхностей деталей, особенно при использовании аналоговых средств измерений, что находит свое отражение в величине погрешности СИ. Исходя из этого наибольшая эффективность при замене рекомендуемых СИ на цифровые достигается при контроле внутренних диаметров втулок, поскольку количество неправильно принятых и неправильно забракованных снизилось более существенно. На основании расчетов можно сделать вывод о целесообразности перехода на цифровые СИ начиная контролем внутренних диаметров.

Список источников

1. Леонов О.А., Лазарь В.В., Антонова У.Ю. и др. Расчет интегрального показателя качества вертикально-хонинговального станка для финишной обработки гильз // Вестник машиностроения. 2025. Т. 104, № 1. С. 7-11. EDN: UXKZZC
2. Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Вергазова Ю.Г., Хасьянова Д.У. Обоснование посадок соединений со шпонками // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2022. № 6. С. 65-71. EDN: EITIEV
3. Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Вергазова Ю.Г. Определение предельных функциональных зазоров подшипника скольжения в условиях гидродинамической смазки // Трение и износ. 2024. Т. 45, № 4. С. 327-334. <https://doi.org/10.32864/0202-4977-2024-45-4-327-334>
4. Ерохин М.Н., Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж. и др. Нормирование шероховатости поверхностей валов в соединениях с резиновыми армированными манжетами // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2024. № 2. С. 104-111. https://doi.org/10.52261/02346206_2024_2_104
5. Леонов О.А., Зимогорский В.К., Вергазова Ю.Г. и др. Инструментальный контроль дефектов коренных опор блока цилиндров // Агроинженерия. 2024. Т. 26, № 2. С. 65-70. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-2-65-70>
6. Глубоков А.В., Ястребова Т.С. Проблемы автоматизации выбора универсальных средств измерений линейных размеров // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2018. № 4 (26). С. 37-42. EDN: VRZLBE
7. Глубоков А.В., Глубокова С.В., Емельянов П.Н., Афонина И.В. К проблеме построения автоматизированной системы метрологического обеспечения измерений для машиностроительных предприятий // Вестник МГТУ «Станкин». 2023. № 2 (65). С. 98-104. EDN: LBPXLI
8. Бондарева Г.И., Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж. и др. Обоснование замены индикаторных головок на цифровые при контроле ремонта машин // Сельский механизатор. 2022. № 4. С. 26-27. EDN: CFWPWW
9. Темасова Г.Н. Допусковый контроль валов в ремонтном производстве // Сельский механизатор. 2023. № 8. С. 40-41. EDN: PAFUWP
10. Темасова Г.Н. Оценка брака в ремонтном производстве: инновационный подход к контролю деталей типа «вал» // Вестник НГИЭИ. 2024. № 2 (153). С. 48-58. EDN: LZFQHQ

Выводы

Проведенные исследования показали, что при контроле опорных шеек распределительного вала двигателя ЯМЗ-236 замена рекомендуемого средства измерений СР-75 на цифровой микрометр Dasqua 4105 позволила снизить годовые потери в 1,36 раза, а экономия за весь срок эксплуатации превысила 2059 тыс. руб. При контроле внутреннего диаметра втулок замена нутромера НИ 50-100 на цифровой нутромер Dasqua 4511 позволила снизить годовые потери в 1,96 раза, экономия за весь срок эксплуатации составила более 3830 тыс. руб. Затраты на внедрение цифровых средств измерений полностью компенсируются за счет экономии, полученной в течение всего срока их эксплуатации.

References

1. Leonov O.A., Lazar V.V., Antonova U.Yu. Calculation of the integral quality indicator of a vertical honing machine for finishing processing of cylinder liners. *Vestnik mashinostroeniya*. 2025;104(1):7-11. (In Russ.) <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2025-104-1-7-11>
2. Leonov O.A., Shkaruba N.Zh., Vergazova Yu.G., Khasyanova D.U. Justification of keyed joint fits. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*. 2022;6:65-71. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0235711922060074>
3. Leonov O.A., Shkaruba N.Zh., Vergazova Yu.G. Determination of the maximum functional clearances of a plain bearing under hydrodynamic lubrication conditions. *Friction and Wear*. 2024;45(4):327-334. (In Russ.) <https://doi.org/10.32864/0202-4977-2024-45-4-327-334>
4. Erokhin M.N., Leonov O.A., Shkaruba N.Zh. Standardization of shaft surface roughness in joints with metal insert rubber seals. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii*. 2024;2:104-111. (In Russ.) https://doi.org/10.52261/02346206_2024_2_104
5. Leonov O.A., Zimogorskiy V.K., Vergazova Yu.G., Antonova U.Yu., Leonov D.O. Instrumental control of defects in the main bearings of the cylinder block. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2024;26(2):65-70. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-2-65-70>
6. Glubokov A.V., Yastrebova T.S. Problems of automation of the selection of universal measuring instruments of linear dimensions. *Measuring. Monitoring. Management. Control*. 2018;4(26):37-42. (In Russ.)
7. Glubokov A.V., Glubokova S.V., Emelyanov P.N., Afonina I.V. On the problem of creating an automated system of metrological measurements support for machine building enterprises. *Vestnik MGTU "Stankin"*. 2023;2:98-104. (In Russ.)
8. Bondareva G.I., Leonov O.A., Shkaruba N.Zh. Justification for replacing indicator heads with digital ones when monitoring the repair of machines. *Selskiy mekhanizator*. 2022;4:26-27. (In Russ.)
9. Temasova G.N. Tolerance control of shafts in repair production. *Selskiy mekhanizator*. 2023;8:40-41. (In Russ.)
10. Temasova G.N. Evaluation of defects in repair production: an innovative approach to the control of "shaft" type parts. *Vestnik NGIEI*. 2024;2:48-58. (In Russ.)

Информация об авторах

¹ Голиницкий Павел Вячеславович, канд. техн. наук, доцент;
gpv@rgau-msha.ru[✉]; SPIN-код: 2323-0797;
<https://orcid.org/0000-0001-7303-1658>

² Антонова Ульяна Юрьевна, канд. техн. наук, доцент;
uantonova@rgau-msha.ru; SPIN-код: 5691-6381,
<https://orcid.org/0000-0003-0126-3550>

³ Пупкова Дарья Александровна, канд. техн. наук, доцент;
bogolyubova@rgau-msha.ru; SPIN-код: 4290-2003,
<https://orcid.org/0000-0002-0273-2796>

^{1,2,3} Российский государственный аграрный университет –
МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550,
Российская Федерация, г. Москва, Тимирязевская ул., 49

Author Information

Pavel V. Golinitzkiy¹, PhD (Eng), Associate Professor;
gpv@rgau-msha.ru[✉]; SPIN-code: 2323-0797;
<https://orcid.org/0000-0001-7303-1658>;
Scopus Author ID: 57216809753;
ResearcherID: AAD-6305-2022

Ulyana Yu. Antonova², PhD (Eng), Associate Professor;
uantonova@rgau-msha.ru; SPIN-code: 5691-6381;
<https://orcid.org/0000-0003-0126-3550>;
Scopus Author ID: 57216809631;
ResearcherID: AAD-5690-2022

Darya A. Pupkova³, PhD (Eng), Associate Professor;
bogolyubova@rgau-msha.ru; SPIN-code: 4290-2003;
<https://orcid.org/0000-0002-0273-2796>;
Scopus Author ID: 57488490600;
ResearcherID: AAD-6559-2022

^{1,2,3} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev
Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya Str., Moscow,
127550, Russian Federation.

Вклад авторов

П.В. Голиницкий – методология, концептуализация;
У.Ю. Антонова – информационные ресурсы и аналитика, со-
здание окончательной версии рукописи и ее редактирование;
Д.А. Пупкова – литературный обзор, визуализация, создание
черновика рукописи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут
ответственность за плагиат

Author Contribution

P.V. Golinitzkiy – methodology, conceptualization.
D.A. Pupkova – literature review, visualization, writing – origi-
nal draft.
U.Yu. Antonova – resources and analytics, writing – manuscript
review and editing.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest and are responsible for pla-
giarism.

Статья поступила 18.09.2025, после рецензирования
и доработки 21.01.2026; принята к публикации 26.01.2026

Received 18.09.2025; Revised 21.01.2026; Accepted 26.01.2026

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 633.34:535.34

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-1-87-96>



Идентификация сортов семян сои спектральным люминесцентным методом

М.В. Беляков

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия

bmw20100@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4371-8042>

Аннотация. Оптические спектральные фотолюминесцентные методы диагностики, отличающиеся быстродействием и низкой стоимостью реализации, могут стать альтернативой имеющимся методам сортовой идентификации семян. Исследования проведены с целью разработки методики идентификации сортов семян сои спектральным люминесцентным методом. На дифракционном спектрофлуориметрическом комплексе измеряли спектральные характеристики возбуждения люминесценции семян сои 6 сортов: очень ранней спелости Пума и Саяна, ранней спелости Грея и Селена, среднеспелых Вилана и Вилана бета. По полученным зависимостям рассчитали интегральные и статистические параметры: интегральную поглощательную способность, математическое ожидание, дисперсию, асимметрию и эксцесс. Характеристики возбуждения фотолюминесценции семян сои расположены в области 330...475 нм с основными максимумами на 392 и 420 нм. Для разложения на гауссианы спектры переведены в частотную область и выполнено обратное преобразование Фурье. В результате исследований в качестве параметра идентификации сортов семян выбрана интегральная поглощательная способность в диапазоне 350...396 нм. Наиболее эффективным статистическим параметром признана асимметрия, позволяющая однозначно идентифицировать 3 сорта семян сои. Параметры гауссиан разложения: дисперсия, асимметрия и частотное математическое ожидание – могут применяться для однозначной идентификации всех исследованных сортов. Методика идентификации сортов семян сои включает в себя пробоподготовку образцов, облучение в диапазоне 330...475 нм и регистрацию приемником излучения фотолюминесцентных сигналов для получения зависимости $U(\lambda)$, из которой рассчитываются параметры сортовой идентификации семян: амплитуда и дисперсия гауссиан, частотное математическое ожидание, интегральная поглощательная способность и асимметрия. Для реализации разработанной методики используются узкоспектральные светодиоды и широкоспектральный фотодиод. Характеристики фотосигналов $U(\lambda)$ позволяют установить сортовую принадлежность семян. Полученные результаты могут быть использованы для создания портативного быстродействующего устройства контроля сорта в лабораторных и полевых условиях.

Ключевые слова: идентификация сортов семян; соя; сорта семян сои; фотолюминесцентные методы диагностики; фотосигнал; фотодиод; спектральные характеристики возбуждения; гауссианы

Финансирование. Работа выполнена в ФГБНУ ФНАЦ ВИМ в рамках госзадания FGUN-2025-0007.

Для цитирования: Беляков М.В. Идентификация сортов семян сои спектральным люминесцентным методом // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 1. С. 87-96. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-1-87-96>

ORIGINAL ARTICLE

Identification of soybean seed varieties by spectral luminescence method

M. V. Belyakov

Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Moscow, Russia

bmw20100@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4371-8042>

Abstract. Optical spectral photoluminescent diagnostic methods, characterized by high speed and low implementation costs, can serve as an alternative to existing methods of varietal seed identification. The study

aims to develop a methodology for identifying soybean seed varieties using a spectral luminescence method. The author used a diffraction spectrofluorimetric complex to measure the spectral excitation characteristics of photoluminescence in six soybean varieties: ultra-early maturing (Puma and Sayana), early maturing (Greya and Selen), and mid-maturing (Vilana and Vilana beta). Based on the obtained dependencies, he calculated integral and statistical parameters: integral absorptive capacity, mathematical expectation, variance, skewness, and kurtosis. The photoluminescence excitation characteristics of soybean seeds were found in the range between 330 and 475 nm, with primary peaks at 392 and 420 nm. For Gaussian decomposition, the spectra were converted to the frequency domain using the inverse Fourier transform. Based on the research findings, the author selected the integral absorptive capacity in the range between 350 and 396 nm as the variety identification parameter. Skewness was recognized as the most effective statistical parameter for the unambiguous identification of three soybean varieties. Gaussian decomposition parameters – variance, skewness, and frequency-domain mathematical expectation – can be applied for the unique identification of all studied varieties. The methodology for identifying soybean seed varieties includes sample preparation, irradiation in the range between 330 and 475 nm, and registration of photoluminescent signals by a radiation receiver to obtain the $U(\lambda)$ dependency and, based on it, calculate the varietal identification parameters: Gaussian amplitude and variance, frequency-domain mathematical expectation, integral absorptive capacity, and skewness. Narrow-spectrum LEDs and a broad-spectrum photodiode are used to implement the developed methodology. The characteristics of the $U(\lambda)$ photo-signals help determine the varietal affiliation of the seeds. The results obtained can be used to develop a portable, high-speed variety control device for both laboratory and field conditions.

Keywords: seed variety identification; soybean; soybean seed varieties; photoluminescent diagnostic methods; photo-signal; photodiode; spectral excitation characteristics; Gaussians

Funding. The work was carried out at the Federal Scientific Agroengineering Center VIM within the framework of State assignment No. FGUN-2025-0007.

For citation: Belyakov M.V. Identification of soybean seed varieties by spectral luminescence method. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(1):87-96 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-1-87-96>

Введение

Соя *Glycine max* (L.) является важной сельскохозяйственной культурой во всем мире благодаря ценному составу семян, универсальности (корм, продукт питания и промышленное сырье) и стабильному генетическому прогрессу. Предполагалось, что в 2025 г. по сравнению с 2019 г. мировые объемы переработки сои увеличатся на 21...22%. При этом Российская Федерация занимает 6 место по объемам переработки [1].

Обеспечение чистоты семян и поддержание стандартов качества сои зависят от сортовой классификации и региона происхождения. Качество бобов сои определяется содержанием белка и аминокислот, масла и жирных кислот, углеводов, а также пищевой ценностью. Так, при исследовании качества 49 сортов соевых бобов из 15 стран выявлены различия в зависимости от географического происхождения и обнаружена корреляция между содержанием белка и содержанием дайдзеина в соевых бобах. У 6 сортов сои с высоким содержанием питательных веществ наблюдалось повышение уровня белка, минералов и изофлавонов [2].

Достижения в области технологий диагностики растений и семян значительно повысили производительность сельского хозяйства при одновременном

сокращении потребления ресурсов [3]. Это привело к повышению урожайности за счет улучшенного мониторинга, выявления склонности к болезням и оптимизации технологических процессов выращивания. Каждая из используемых технологий обладает уникальными преимуществами, подходящими для различных сельскохозяйственных операций, селекционных программ и лабораторных исследований. Потенциал этих методов может быть использован для улучшения процесса принятия решений в селекции сои.

Ранее принадлежность семян к определенному сорту определялась по морфологическим параметрам: форме, размеру, цвету и др. Такая оценка субъективна и зависит от исследователя, к тому же некоторые сорта очень схожи внешне.

Современные методы идентификации сортов семян основаны на анализе микросателлитных локусов ДНК [4], использовании вертикального электрофореза запасных белков семян [5], ДНК-фингерпринтинга с помощью молекулярных маркеров на основе ПЦР, газовой хроматографии, сопряженной с масс-спектрометрией [6].

Среди оптических спектральных методов мониторинга и фенотипирования выделяются гиперспектральная визуализация и отражательная

инфракрасная спектроскопия. В исследовании [7] изучалась возможность распознавания 5 сортов сои на разных стадиях зрелости с помощью гиперспектральной визуализации в диапазоне 395,5...1003,7 нм. Разработана и проверена модель машинного обучения, использующая вегетационные индексы и изображения растительного покрова, полученные с помощью аэрофотосъемки [8]. Для извлечения признаков из изображений использовались сверточные нейронные сети с трансферным обучением. Были обнаружены значительные корреляции между агрономическими показателями, вегетационными индексами и характеристиками растительного покрова. Высокая наследуемость красно-зелено-синего вегетационного индекса и индекса зеленых листьев указывает на их потенциальную полезность при генетической оценке. Разработан метод инфракрасной спектроскопии для диагностики параметров липидов сои с помощью инфракрасного спектрофотометра с преобразованием Фурье (FTIR) на основе метода ослабления полного отражения в диапазоне 400...4000 см^{-1} [9].

Для различения сортов семян сои предложена модель, основанная на технологии гиперспектральной визуализации в спектральном диапазоне 866,4...1701,0 нм и одномерной сверточной нейронной сети [10], а также методом инфракрасной спектроскопии [11]. Подобные технологии гиперспектральной визуализации предлагались для сортовой идентификации семян кукурузы [12], ячменя [13], пшеницы [14] и сорго [15]. Однако гиперспектральная визуализация проводится исключительно по морфологическим характеристикам зерна и требует предварительной обработки изображений для сглаживания и уменьшения объема данных, что не подходит для идентификации в реальном времени. Кроме того, приборы для инфракрасного диапазона являются дорогостоящими, требуют построения высококачественного изображения и необходимости нейронных сетей. Этих недостатков лишены оптические спектральные фотолюминесцентные методы диагностики, которые имеют более низкую стоимость реализации, являются быстродействующими и не требуют построения изображений, поэтому могут стать достойной альтернативой имеющимся методам сортовой идентификации семян.

Цель исследований: разработка методики идентификации сортов семян сои спектральным люминесцентным методом для создания портативного быстродействующего устройства контроля сорта в лабораторных и полевых условиях.

Материалы и методы

Исследовали семена сои 6 сортов: очень ранней спелости Пума и Саяна, ранней спелости Грея и Селена, среднеспелых Вилана и Вилана бета, выведенных в ФГБНУ «Федеральный научный центр "Всероссийский научно-исследовательский институт масличных культур имени В.С. Пустовойта"» (г. Краснодар).

Спектральные характеристики возбуждения люминесценции $\eta(\lambda)$ измеряли в ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (г. Москва) на лабораторной установке, включающей в себя дифракционный спектрофлуориметр CM2203, оптоволоконный световод и внешнюю непрозрачную камеру. По разработанной автором методике [16] проводили предварительное синхронное сканирование в широком диапазоне спектра $\lambda = 230...600$ нм. Затем по полученным максимумам спектра измеряли характеристику люминесцентного свечения и, установив монохроматор регистрации на максимум свечения, измеряли уточненную характеристику возбуждения люминесценции $\eta(\lambda)$. Повторность измерений – 50-кратная для каждого образца сорта семян сои. Далее в программном пакете *Microcal Origin* производили расчет интегральных и статистических параметров – интегральной поглощательной способности $H_{\lambda_1... \lambda_2}$ в спектральном диапазоне $\lambda_1... \lambda_2$, математического ожидания M_λ , дисперсии σ^2 , асимметрии As и эксцесса Ex . Доверительные интервалы рассчитали по общепринятой методике для надежности 0,95.

Результаты и их обсуждение

Спектры возбуждения сои различных сортов в уточненном спектральном интервале 330...475 нм представлены на рисунке 1.

Наибольшее возбуждение происходит в спектральном диапазоне 370...450 нм с основными максимумами примерно на 420 и 392 нм. Максимум на 362 нм выражен менее отчетливо. По сути весь диапазон 330...480 нм является суперпозицией этих максимумов. Наличие максимумов на данных длинах волн характерно для семян большинства растений [16].

При 362 нм возбуждение (эффективное поглощение) может быть вызвано наличием фенольных кислот [17]. Поглощение с максимумом около 420 нм объясняется наличием каротиноидов, рибофлавина, а также суперпозицией спектров излучения терпеноидов, спорополленина, липофусцина [18, 19].

Ранее для широкодиапазонных синхронных спектров было показано, что интегральные параметры возбуждения (поглощательная способность H) зависят от конкретного сорта [20].

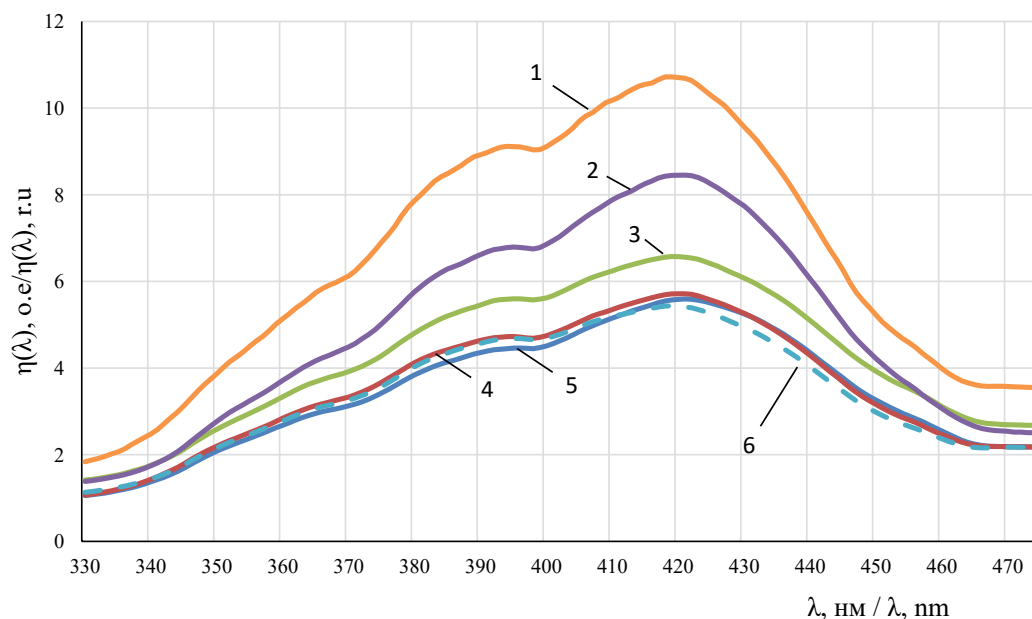


Рис. 1. Спектры возбуждения сои различных сортов:
1 – Селена; 2 – Пума; 3 – Грея; 4 – Вилана бета; 5 – Вилана; 6 – Саяна

Fig. 1. Excitation spectra of soybeans of different varieties:
1 – Selena; 2 – Puma; 3 – Grey; 4 – Vilana beta; 5 – Vilana; 6 – Sayana

Результаты расчетов интегральных параметров представлены в таблице 1. Для расчетов выделены диапазоны, соответствующие максимумам спектра: для коротковолнового максимума – более расширенные 330...396 нм, 350...396 нм, более узкий – 370...396 нм, а для длинноволнового максимума – 396...470 нм. Измерения в более широком диапазоне дают большую величину фотосигнала, а для узкого диапазона можно достигнуть большей величины различия сигналов между сортами.

Для зерна сорта Селена погрешность измерений существенно больше остальных – до 15,5%, у зерна сорта Вилана – до 14,4%, а для остальных сортов не превышает 10,8%. Интегральные параметры возбуждения сортов Вилана и Вилана бета отличаются незначительно. Однако внутри других групп

спелости параметры сильно отличаются: для очень ранних сортов Пума и Саяна – в 1,4...1,5 раза, а для раннеспелых Грея и Селена – в 1,5...1,6 раза.

В качестве основного критерия выбора параметра для сортовой идентификации выбрано максимальное количество однозначно идентифицируемых сортов (без перекрытия доверительных интервалов). В качестве дополнительных предложены критерии: 1) максимальное отношение наибольшего и наименьшего параметров (величина интервала принимаемых значений); 2) величина параметра, пропорциональная регистрируемому фотосигналу; 3) минимальный доверительный интервал (минимальная погрешность). Исходя из этих критериев наиболее эффективным было бы использование интегральных параметров $H_{350...369}$ и $H_{370...369}$, для которых

Интегральные параметры $H_{\lambda_1 \dots \lambda_2}$ спектров возбуждения сои различных сортов

Таблица 1

Integral parameters of $H_{\lambda_1 \dots \lambda_2}$ excitation spectra of soybeans of different varieties

Table 1

Сорт	Интегральная поглощательная способность $H \pm \Delta H$, о.е., для диапазона $\lambda_1 \dots \lambda_2$, нм				
	330...475	330...396	350...396	370...396	396...470
Вилана	491±63	187±27	158±21	105±15	306±37
Вилана бета	503±38	196±16	166±13	110±9	309±22
Грея	600±60	234±21	197±17	131±11	369±40
Пума	697±43	268±18	231±15	157±10	432±27
Саяна	490±32	190±12	160±10	105±6	298±20
Селена	919±124	368±55	315±48	213±33	556±70

3 сорта: Грея, Пума и Селена – однозначно идентифицируются, а максимальные и минимальные значения отличаются в 2 раза. Однако при прочих равных условиях величина $N_{350...369}$ больше примерно в 1,5 раза, что позволяет лучше зарегистрировать пропорциональный ей фотосигнал с помощью приемника излучения. В остальных спектральных диапазонах использование величины N позволяет однозначно идентифицировать только сорт Селена.

Использование для идентификации сортов не самих значений $N_{\lambda_1... \lambda_2}$, а их отношений на разных участках спектра как для синхронных характеристик [20], позволило бы не привязываться к абсолютному значению фотосигнала. Однако отношение интегральных поглощательных способностей N в разных спектральных диапазонах для исследованных сортов отличается не более чем на 8...12% по средним показателям, а доверительный интервал составляет до $\pm 15,5\%$. Таким образом, отношения $N_{\lambda_1... \lambda_2} / N_{\lambda_3... \lambda_4}$ не могут быть использованы для сортовой идентификации даже в качестве вспомогательного параметра.

Результаты расчетов статистических параметров представлены в таблице 2.

Сорт Селена также отличается сравнительно высокой погрешностью: для дисперсии – 27,4%, для асимметрии и эксцесса – 23,8...23,9%. Вместе с тем математическое ожидание для всех сортов определяется весьма точно – с погрешностью до 2,3%, а для других сортов – менее 1%.

По величине математического ожидания и дисперсии невозможно однозначно идентифицировать сорт, также для них наблюдается очень небольшой диапазон изменения параметра по сортам. По эксцессу можно идентифицировать только сорт Селена. Наиболее эффективным параметром является

величина асимметрии, которая может принимать как положительные, так и отрицательные значения, что говорит о правосторонности ($As > 0$) или левосторонности ($As < 0$) графиков $\eta(\lambda)$. По асимметрии можно однозначно идентифицировать зерно сортов Вилана бета, Саяна и Селена с правосторонней асимметрией. Асимметрии различных сортов по абсолютной величине могут различаться в 4,5 раза.

Таким образом, по интегральным и статистическим параметрам спектров возбуждения можно однозначно различить лишь некоторые сорта, а по остальным можно получить лишь вероятность принадлежности тому или иному сорту. Для получения других параметров идентификации можно разложить полученные спектры $\eta(\lambda)$.

Для разложения спектров на элементарные составляющие использовали аналитическую функцию Гаусса. Для этого спектры переводили в частотную область и выполняли обратное преобразование Фурье с получением спектров $\eta_n(f)$. Для этого использовали соотношение:

$$E = \frac{1240}{\lambda}, \quad (1)$$

где E – энергия, эВ; λ – длина волны, нм.

Для унификации результатов при разных абсолютных величинах фотосигналов примем для максимума энергии частоту f_m , равную 1 Гц. Данные преобразования выполнены в программном пакете Microcal Origin 7.0.

Примеры разложения на гауссианы для четырех сортов представлены на рисунке 2.

Полученные спектры $\eta_n(f)$ разлагаются на 2 гауссианы: верхнюю (кривая 2) с большей амплитудой и смещенным вправо максимумом и нижнюю (кривая 3) с меньшей амплитудой и смещенным вправо максимумом.

Статистические параметры спектров возбуждения сои различных сортов

Таблица 2

Statistical parameters of the excitation spectra of soybeans of different varieties

Table 2

Сорт	Математическое ожидание, $M\lambda$, нм	Дисперсия, σ^2	Асимметрия, As	Эксцесс, Ex
Вилана	388 $\pm$ 3	5193 $\pm$ 298	-0,109 $\pm$ 0,013	-0,733 $\pm$ 0,055
Вилана бета	391 $\pm$ 3	5788 $\pm$ 356	0,043 $\pm$ 0,004	-0,642 $\pm$ 0,066
Грея	386 $\pm$ 2	5172 $\pm$ 165	-0,077 $\pm$ 0,011	-0,784 $\pm$ 0,056
Пума	387 $\pm$ 2	4885 $\pm$ 245	-0,069 $\pm$ 0,004	-0,674 $\pm$ 0,083
Саяна	390 $\pm$ 3	5794 $\pm$ 415	0,051 $\pm$ 0,003	-0,672 $\pm$ 0,065
Селена	390 $\pm$ 9	5823 $\pm$ 1598	0,193 $\pm$ 0,046	-0,377 $\pm$ 0,090

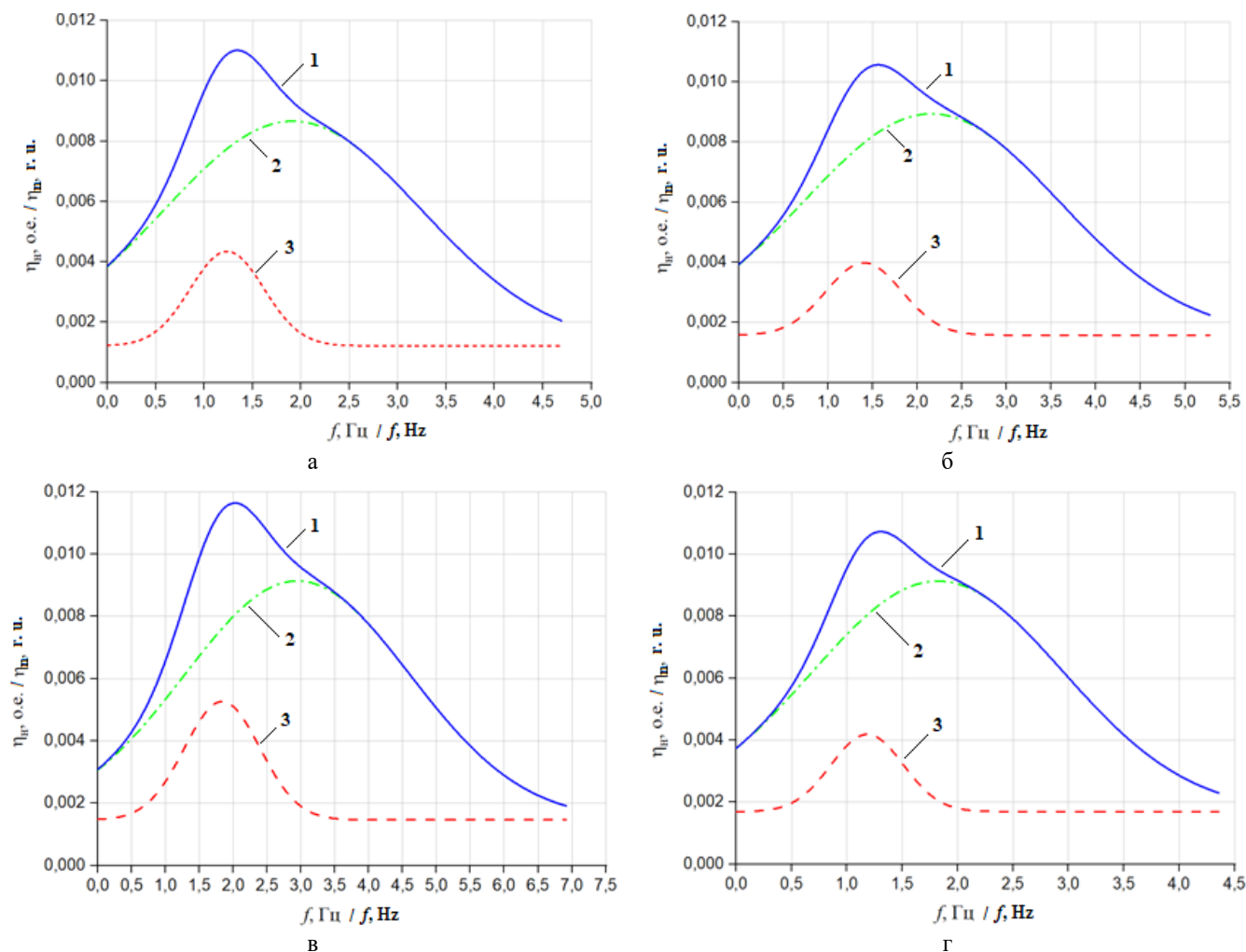


Рис. 2. Спектральные характеристики возбуждения (кривые 1) и их разложение на гауссианы (кривые 2 и 3) для сортов сои:

а) Вилана; б) Грея; в) Пума; г) Саяна

Fig. 2. Spectral characteristics of excitation (curves 1) and their decomposition into Gaussians (curves 2 and 3) for soybean varieties:

a) Wilana, b) Greya, c) Puma, d) Sayana

Гауссианы разложения описываются формулами:

$$\eta_n = \frac{A_b}{\sigma_b \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2}(f - f_b)^2 / \sigma_b^2\right), \quad (2)$$

где η_n – эффективная поглощательная способность, нормированная по частоте; A_b – амплитуда; σ_b – дисперсия; f – текущая частота; f_b – математическое ожидание (по оси частот).

Параметры гауссиан разложения и коэффициенты детерминации представлены в таблице 3.

Разложение каждой кривой $\eta_n(f)$ на 2 гауссианы для большинства сортов осуществляется с очень высокой точностью. Немного меньшая точность получена для кривых сорта Селена.

Параметры разложения очень хорошо подходят для сортовой идентификации – дисперсии, и частотные математические ожидания обеих гауссиан позволяют однозначно идентифицировать все исследованные

сорта. По амплитудам можно идентифицировать сорта Пума, Саяна и Селена. Отношения параметров разложения для двух гауссиан (кривые 2 и 3 на рисунке 2) гораздо менее подходят для идентификации сортов.

Достоинством использования параметров гауссиан является низкая погрешность их определения: не более 4,9% для амплитуды A_b , не более 3,9% для дисперсии σ_b и не более 0,8% для частотного математического ожидания f_b . Однако при использовании только какого-то одного параметра, например, только σ_b или f_b , возможно попадание его значения в промежуток между доверительными интервалами для разных сортов. Кроме того, в дальнейшем база данных параметров спектров будет дополняться значениями других сортов, некоторые диапазоны могут быть уточнены путем увеличения числа измерений и снижения погрешности. Поэтому для сортовой идентификации предлагается использовать несколько различных

Таблица 3

Параметры гауссиан разложения и коэффициенты детерминации частотных спектров возбуждения

Table 3

Parameters of the Gaussian decomposition and the coefficients of determination of the frequency spectra of excitation

Сорт	Амплитуда, A_b , о.е.	Дисперсия, σ_b	Частотное математическое ожидание, f_b , Гц	Точность, R^2
Вилана (кривая 2)	24,80±0,73	3,13±0,05	1,916±0,008	0,997
Вилана (кривая 3)	2,99±0,10	0,89±0,02	1,238±0,007	
Вилана бета (кривая 2)	24,71±0,73	3,03±0,05	1,955±0,008	0,997
Вилана бета (кривая 3)	2,60±0,10	0,85±0,02	1,256±0,008	
Грея (кривая 2)	26,34±0,65	3,36±0,05	2,159±0,009	0,997
Грея (кривая 3)	2,57±0,11	1,00±0,03	1,403±0,010	
Пума (кривая 2)	32,09±0,75	3,92±0,05	2,947±0,013	0,997
Пума (кривая 3)	5,32±0,18	1,32±0,03	1,838±0,009	
Саяна (кривая 2)	21,14±0,62	2,67±0,04	1,821±0,008	0,996
Саяна (кривая 3)	2,04±0,10	0,77±0,03	1,184±0,009	
Селена (кривая 2)	41,08±1,07	4,92±0,07	3,683±0,016	0,966
Селена (кривая 3)	4,91±0,21	1,51±0,04	2,333±0,015	

параметров включая интегральные ($H_{350...396}$), статистические (As) и параметры гауссиан разложения (A_b , σ_b , f_b) для двух кривых. Параметры гауссиан разложения приняты за основные, а интегральный и статистический – за вспомогательные (дополнительные).

Методика спектральной люминесцентной идентификации сортов

Сортовую идентификацию зерна сои (определение вероятности принадлежности к сортам $C_1...C_6$) необходимо осуществлять по полученным значениям 8 ($j=8$) параметров: амплитуды гауссиан A_b (Π_1 и Π_2), дисперсии гауссиан σ_b (Π_3 и Π_4), частотным математическим ожиданиям f_b (Π_5 и Π_6), интегральной поглотительной способности $H_{350...396}$ (Π_7) и асимметрии As (Π_8).

Для каждого известного сорта C_i параметр Π_j принимает значения от a_{ij} до b_{ij} . Тогда средним значением будет $c_{ij} = (a_{ij} + b_{ij}) / 2$. Распределение параметра внутри этого интервала имеет плотность $p_{ij}(\Pi)$.

Каждому из сортов для идентифицируемого объекта будет соответствовать на каждом шаге алгоритма вес w_i , характеризующий вероятность его принадлежности к данному i -тому сорту (0, если такая принадлежность невозможна).

Алгоритм сортовой идентификации

1. В начале алгоритма имеется $i=6$ равновероятных классов (сорт) с весами $w_i=1$.

2. Алгоритм движется по параметрам от 1-го до 4-го. На j -м шаге обрабатываем параметр Π_j . Для каждого C_i умножаем w_i на $p_{ij}(\Pi_j)$.

Если Π_j не попадает в интервал возможных значений для C_i , то $p_{ij}(\Pi_j) = 0$ и вес немедленно станут нулевым; в противном случае это будет некоторое положительное число.

3. В итоге получается набор весов w_i , часть из которых – ненулевая. После нормировки получим вероятности принадлежности конкретным сортам.

Формальная запись алгоритма сортовой идентификации –

$$p_i = \frac{\prod_{j=1}^8 p_{ij}(\Pi_j)}{\sum_{k=1}^6 \prod_{j=1}^8 p_{kj}(\Pi_j)}. \quad (3)$$

При нормальном распределении и среднеквадратичном отклонении σ_{ij} каждый параметр имеет распределение:

$$p_{ij}(\Pi) = \begin{cases} \Phi\left(\frac{\Pi - c_{ij}}{\sigma_{ij}}\right), & \Pi \in [a_{ij}, b_{ij}] \\ 0, & \Pi \notin [a_{ij}, b_{ij}] \end{cases}, \quad (4)$$

где Φ – производящая функция при стандартном распределении.

Тогда

$$p_i = \begin{cases} \frac{\prod_{j=1}^8 \Phi\left(\frac{\Pi - c_{ij}}{\sigma_{ij}}\right)}{\sum_{\Pi_k \in [a_{ij}, b_{ij}]} \prod_{j=1}^8 \Phi\left(\frac{\Pi - c_{kj}}{\sigma_{kj}}\right)}, & \text{если } \Pi_j \in [a_{ij}, b_{ij}] \text{ для } j=1-8 \\ 0, & \text{если иначе.} \end{cases} \quad (5)$$

Для измерения зависимости $\eta(\lambda)$ предполагается разбить рабочий спектральный диапазон 330...475 нм на 10 участков, в каждом из которых излучает узкоспектральный источник излучения. Поток фотолюминесцентного излучения от исследуемых образцов при последовательном облучении регистрируется широкоспектральным приемником излучения для получения фотосигнала U_i , пропорционального η_i .

Методика сортовой идентификации семян сои спектральным люминесцентным методом включает в себя следующие этапы:

1. Пробоподготовка – отбор образцов семян без внешних повреждений и загрязнений; размещение образцов в светонепроницаемой камере.

2. Поочередное облучение источниками излучения в диапазоне 330...475 нм исследуемых образцов с регистрацией фотосигналов U_i приемниками излучения.

3. Интегрирование (суммирование) полученных фотосигналов в диапазоне 350...396 нм для расчета $H_{350...396}$.

4. Получение зависимости $U_i(\lambda_i)$, пропорциональной $\eta(\lambda)$ в диапазоне 330...475 нм.

5. Расчет асимметрии As по зависимости $U_i(\lambda_i)$.

6. Расчет параметров гауссиан разложения – перевод в частотную область характеристики $U_i(\lambda_i)$, обратное преобразование Фурье, разложение на гауссианы с использованием формулы (2).

7. Вероятностная идентификация сорта сои по 6 основным ($\Pi_1 - \Pi_6$) и 2 дополнительным (Π_7, Π_8) параметрам.

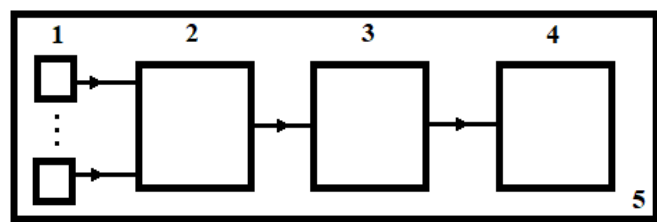


Рис. 3. Структурная схема установки сортовой идентификации семян сои:

1 – светодиоды; 2 – исследуемые образцы; 3 – фотодиод;
4 – электронный блок с цифровым дисплеем;
5 – светонепроницаемая камера

Fig. 3. Structural diagram of the soybean seed variety identification system:

1 – LEDs; 2 – samples under study;
3 – photodiode; 4 – electronic unit with a digital display;
5 – light-proof chamber

Для аппаратной реализации методики разработана схема установки (рис. 3), где в качестве узкоспектральных источников излучения используются светодиоды 1, а в качестве приемника излучения – фотодиод 3. Источники и приемники вместе с образцами 2 расположены в темной светонепроницаемой камере 5, а рабочая информация (режимы работы, длина волны и др.) могут быть отражены на цифровом дисплее после обработки в электронном блоке 4. Фотосигналы $U_i(\lambda_i)$ передаются на внешний компьютер для преобразований, расчетов и окончательной сортовой идентификации.

Основным направлением дальнейшей работы является увеличение числа идентифицируемых сортов путем расширения базы данных анализируемых параметров.

Выводы

1. Характеристики возбуждения фотолюминесценции семян сои расположены в области 330...475 нм с основными максимумами на 392 и 420 нм. В качестве параметра идентификации выбрана интегральная поглощательная способность H в диапазоне 350...396 нм.

2. Наиболее эффективным статистическим параметром является асимметрия, по которой можно однозначно идентифицировать зерно сортов Вилана бета, Саяна и Селена с правосторонней асимметрией ($As > 0$). Абсолютные величины асимметрии различных сортов могут различаться до 4,5 раза.

3. С высокой точностью частотные спектры поглощения разлагаются на 2 гауссианы, параметры которых (амплитуда, дисперсия и частотное математическое ожидание) могут использоваться для однозначной идентификации всех исследованных сортов.

Методика сортовой идентификации семян включает в себя пробоподготовку образцов, последовательное облучение в диапазоне 330...475 нм и регистрацию фотолюминесцентных сигналов для получения зависимости $U(\lambda)$. Из полученной зависимости рассчитываются 8 параметров для сортовой идентификации семян: амплитуду гауссиан (Π_1 и Π_2), дисперсию гауссиан (Π_3 и Π_4), частотное математическое ожидание (Π_5 и Π_6), интегральную поглощательную способность $H_{350...396}$ (Π_7) и асимметрию (Π_8).

4. Для аппаратной реализации разработанной методики используются узкоспектральные светодиоды и широкоспектральный фотодиод. Полученные характеристики $U(\lambda)$ обрабатываются в математических программных пакетах.

Список источников

1. Векленко В.И., Дадашев Б.А. Производство соевого масла в мире и России // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2024. № 2. С. 192-197. EDN: VVCZTD
2. Li M., Zhao M., Shi J. et al. Discovery and verification of soybean sprouting selection based on quality across various origins and varieties: Varietal effects on sprouted soybean quality. *Food Science & Nutrition*. 2025;13:e70016. <https://doi.org/10.1002/fsn3.70016>
3. Лобачевский Я.П., Дорохов А.С. Цифровые технологии и роботизированные технические средства для сельского хозяйства // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2021. Т. 15, № 4. С. 6-10. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10>
4. Рамазанова С.А., Савиченко В.Г., Устарханова Э.Г. и др. Поиск новых SSR-локусов ДНК для создания эффективной технологии генотипирования сои // Масличные культуры. 2021. № 4 (188). С. 18-24. <https://doi.org/10.25230/2412-608X-2021-4-188-18-24>
5. Ториков В.Е., Шпилев Н.С., Клименков Ф.И. Использование электрофоретических методов для идентификации сортов зерновых культур // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2019. № 2 (172). С. 5-12. EDN: AJATOZ
6. Смоликова Г.Н., Шаварда А.Л., Алексейчук И.В. и др. Метаболомный подход к оценке сортовой специфичности семян *Brassica napus* L. // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2015. Т. 19, № (1). С. 121-127. <https://doi.org/10.18699/VJ15.015>
7. Pang L., Wang Z., Mi S., Li H. Feasibility study on identifying seed variety of soybean with hyperspectral imaging and deep learning. *Journal of Chemometrics*. 2025;39(5):e70035. <https://doi.org/10.1002/cem.70035>
8. Miranda M.C.C., Aono A.H., Fagundes T.G. et al. High-throughput phenotyping and machine learning techniques in soybean breeding: Exploring the potential of aerial imaging and vegetation indices. *Agronomy Journal*. 2025;117(1):e70012. <https://doi.org/10.1002/agj2.70012>
9. Kumar A., Sahu J.K., Naik S., Suhas Dr. Lipid characterization of black soybean (*Glycine max* [L.] Merrill) seeds using GC-MS/HS fingerprinting. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2022;46(2):e17092. <https://doi.org/10.1111/jfpp.17092>
10. Li H., Zhang L., Sun H. et al. Identification of soybean varieties based on hyperspectral imaging technology and one-dimensional convolutional neural network. *Journal of Food Process Engineering*. 2021;44(15):e13767. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13767>
11. Александрова В.А., Лысенкова А.А. Идентификация сорта сои методами оптической спектроскопии // Товаровед продовольственных товаров. 2025. № 2 (247). С. 84-87. EDN: EYKZXZ
12. Xu P., Yang R., Zeng T. et al. Varietal classification of maize seeds using computer vision and machine learning techniques. *Journal of Food Process Engineering*. 2021;44(2):e13846. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13846>
13. Singh T., Garg N.M., Iyengar S.R.S. Nondestructive identification of barley seeds variety using near-infrared hyperspectral imaging coupled with convolutional neural network. *Journal of Food Process Engineering*. 2021;44(6):e13821. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13821>
14. Sharma A., Singh T., Garg N. Nondestructive identification of wheat seed variety and geographical origin using near-infrared

References

1. Veklenko V.I., Dadashev B.A. Soybean oil production in the world and Russia. *Vestnik Kurskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii*. 2024;2:192-197. (In Russ.)
2. Li M., Zhao M., Shi J., Huang Y., Li L., Jin N., Kong Z., Simal-Gandara J., Wang F., Fan B., Xie H. Discovery and Verification of Soybean Sprouting Selection Based on Quality Across Various Origins and Varieties: Varietal Effects on Sprouted Soybean Quality. *Food Science & Nutrition*. 2025;13:e70016. <https://doi.org/10.1002/fsn3.70016>
3. 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>
4. Ramazanova S.A., Savichenko V.G., Ustarkhanova E.G. et al. Search of the new SSR-loci of DNA for development of effective technology for soybean genotyping. *Oil crops*. 2021;4(188):18-24. (In Russ.) <https://doi.org/10.25230/2412-608X-2021-4-188-18-24>
5. Torikov V.E., Shpilev N.S., Klimenkov F.I. Electrophoretic techniques for crops variety identification. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2019;2(172):5-12. (In Russ.)
6. Smolikova G.N., Shavarda A.L., Alekseichuk I.V. et al. The metabolomic approach to the assessment of cultivar specificity of *Brassica napus* L. seeds. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Seleksii = Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2015;19(1):121-127. (In Russ.) <https://doi.org/10.18699/VJ15.015>
7. Pang L., Wang Z., Mi S., Li H. Feasibility study on identifying seed variety of soybean with hyperspectral imaging and deep learning. *Journal of Chemometrics*. 2025;39(5):e70035. <https://doi.org/10.1002/cem.70035>
8. Miranda M.C.C., Aono A.H., Fagundes T.G. et al. High-throughput phenotyping and machine learning techniques in soybean breeding: Exploring the potential of aerial imaging and vegetation indices. *Agronomy Journal*. 2025;117(1):e70012. <https://doi.org/10.1002/agj2.70012>
9. Kumar A., Sahu J.K., Naik S., Suhas Dr. Lipid characterization of black soybean (*Glycine max* [L.] Merrill) seeds using GC-MS/HS fingerprinting. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2022;46(2):e17092. <https://doi.org/10.1111/jfpp.17092>
10. Li H., Zhang L., Sun H. et al. Identification of soybean varieties based on hyperspectral imaging technology and one-dimensional convolutional neural network. *Journal of Food Process Engineering*. 2021;44(15):e13767. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13767>
11. Alexandrova V.A., Lysenkova A.A. Identification of soybean varieties by optical spectroscopy methods. *Food Products Commodity Expert*. 2025;2(247):84-87. (In Russ.)
12. Xu P., Yang R., Zeng T. et al. Varietal classification of maize seeds using computer vision and machine learning techniques. *Journal of Food Process Engineering*. 2021;44(2):e13846. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13846>
13. Singh T., Garg N.M., Iyengar S.R.S. Nondestructive identification of barley seeds variety using near-infrared hyperspectral imaging coupled with convolutional neural network. *Journal of Food Process Engineering*. 2021;44(6):e13821. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13821>
14. Sharma A., Singh T., Garg N. Nondestructive identification of wheat seed variety and geographical origin using near-infrared hyperspectral imagery and deep learning. *Journal of Chemometrics*. 2024;38(2):e3585. <https://doi.org/10.1002/cem.3585>
15. Nazari L., Shaker M., Karimi A., Ropelewska E. Identification of sorghum genotypes using a machine vision system.

hyperspectral imagery and deep learning. *Journal of Chemometrics*. 2024;38(2):e3585. <https://doi.org/10.1002/cem.3585>

15. Nazari L., Shaker M., Karimi A., Ropelewska E. Identification of sorghum genotypes using a machine vision system. *Journal of Food Process Engineering*. 2021;44(5):e13673. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13673>

16. Беляков М.В. Оптические люминесцентные свойства семян сельскохозяйственных растений // Агрофизика. 2024. № 4. С. 72-78. EDN: ММУНХЗ

17. Pan Y.-L. Detection and characterization of biological and other organic-carbon aerosol particles in atmosphere using fluorescence. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2015;150:12-35. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2014.06.007>

18. Matveeva T.A., Sarimov R.M., Persidskaya O.K. et al. Application of fluorescence spectroscopy for early detection of fungal infection of winter wheat grains. *AgriEngineering*. 2024;6(3):3137-3158. EDN: JEGUAV

19. Donaldson L. Autofluorescence in Plants. *Molecules*. 2020;25(10):2393. <https://doi.org/10.3390/molecules25102393>

20. Беляков М.В., Лысенкова А.А. Сортовые особенности фотолюминесценции сои // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2025. № 2. С. 12-16. <https://doi.org/10.31857/S2500208225020032>

Информация об авторе

Беляков Михаил Владимирович, д-р техн. наук, главный научный сотрудник; Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5; bmw20100@mail.ru; SPIN-код: 2864-9937; <https://orcid.org/0000-0002-4371-8042>

Статья поступила 17.09.2025, после рецензирования и доработки 26.01.2026; принята к публикации 28.01.2026

Journal of Food Process Engineering. 2021;44(5):e13673. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13673>

16. Belyakov M.V. Optical luminescent properties of agricultural plants' seeds. *Agrophysica*. 2024;4:72-78. (In Russ.)

17. Pan Y.-L. Detection and characterization of biological and other organic-carbon aerosol particles in atmosphere using fluorescence. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2015;150:12-35. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2014.06.007>

18. Matveeva T.A., Sarimov R.M., Persidskaya O.K., et al. Application of fluorescence spectroscopy for early detection of fungal infection of winter wheat grains. *AgriEngineering*. 2024;6(3):3137-3158.

19. Donaldson L. Autofluorescence in Plants. *Molecules*. 2020;25(10):2393. <https://doi.org/10.3390/molecules25102393>

20. Belyakov M.V., Lysenkova A.A. Varietal features of soybean photoluminescence. *Vestnik of the Russian Agricultural Science*. 2025;2:12-16. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S2500208225020032>

Author Information

Mikhail V. Belyakov, DSc (Eng), Chief Research Engineer; Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 109428, Moscow, 1st Institutskiy Proezd Str., 5; bmw20100@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4371-8042>; ResearcherID: W-2746-2018; Scopus Author ID: 6701456418

Received 17.09.2025; Revised 26.01.2026; Accepted 28.01.2026

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.147:620.92

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-1-97-104>

Применение на птицефабрике биоэнергетической установки в качестве нетрадиционного источника энергии

В.Т. Водяников

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия

vvt-5210@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7111-9437>

Аннотация. Биоэнергетическая установка (БЭУ) на сельскохозяйственном предприятии позволит из биомассы получать тепловую и электрическую энергию на производственные нужды. Для птицефабрики ООО «Агрофирма "Липецк"» предложен инвестиционный проект, предусматривающий внедрение БЭУ, позволяющей перерабатывать биологические отходы птицеводства, получать энергию и биоудобрение. Цель исследований – представить перспективную технологию по переработке отходов птицеводства; рассчитать проектные технико-экономические показатели БЭУ. Рассмотрены принцип работы, возможность и экономическая целесообразность применения БЭУ, способной ежегодно переработать 15987 т куриного помета и 3590 т падежа птицы. Установлено, что применение биоэнергетической установки компании «RIELA» объемом биореактора 4000 м³ и накопителя 550 м³ позволит утилизировать биологические отходы птицеводства, получать ежегодно товарную тепловую (887 Гкал) и электрическую (12116 МВт·ч) энергию для производственных нужд, а также твердое биоудобрение (9964,5 т). В соответствии с проектом требуемый объем инвестиций составит 317,9 млн руб. Прогнозный производственный эффект, включающий в себя стоимостную оценку получаемой электрической, тепловой энергии и биоудобрения, составит 166,7 млн руб. Годовые издержки, связанные с эксплуатацией БЭУ, составят 40,1 млн руб. За расчетный период (10 лет) чистый дисконтированный доход составит около 550 млн руб., индекс доходности инвестиций – 2,85 при сроке их окупаемости 4,1 года. Применение на птицефабрике биоэнергетической установки позволит улучшить экологическую ситуацию за счет безотходной переработки отходов производства.

Ключевые слова: применение на птицефабрике биоэнергетической установки; биоэнергетическая установка; БЭУ; технико-экономические показатели БЭУ; биологические отходы птицеводства; биоудобрение; инвестиционный проект

Для цитирования: Водяников В.Т. Применение на птицефабрике биоэнергетической установки в качестве нетрадиционного источника энергии // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 1. С. 97-104. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-1-97-104>

ORIGINAL ARTICLE

Application of a bioenergy plant as an alternative energy source at a poultry farm

V.T. Vodyannikov

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia

vvt-5210@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7111-9437>

Abstract. A bioenergy plant (BEP) at an agricultural enterprise generates thermal and electrical energy from biomass for production needs. The author proposes an investment project for the poultry farm *Agrofirma Lipetsk OOO*, involving the implementation of a BEP capable of processing biological poultry waste into energy and biofertilizer. The research aims to present a promising technology for poultry waste processing and calculate the projected technical and economic indicators of the BEP. The study considers the operating principle, feasibility, and economic expediency of using a BEP capable of annually processing 15,987 tons of chicken manure and 3,590 tons of poultry carcasses. It was established that the use of a *RIELA* bioenergy plant with a bioreactor volume of 4,000 m³ and a storage capacity of 550 m³ will enable the disposal of biological poultry waste and the annual generation of commercial thermal energy (887 Gcal) and electrical energy (12,116 MWh) for production needs, as well as solid biofertilizer (9,964.5 tons). According to the project, the required investment is 317.9 million roubles. The projected production effect, which includes the valuation of the generated electricity, heat, and biofertilizer, is 166.7 million roubles. Annual operating costs for the BEP will amount to 40.1 million roubles. Over the 10-year calculation period, the Net Present Value (NPV) will be approximately 550 million roubles, with a Profitability Index (PI) of 2.85 and

a payback period of 4.1 years. Implementing a bioenergy plant at the poultry farm will improve the environmental situation through the zero-waste processing of production waste.

Keywords: bioenergy plant application at a poultry farm; bioenergy plant; BEP; technical and economic indicators of a BEP; biological poultry waste; biofertilizer; investment project

For citation: Vodyannikov V.T. Application of a bioenergy plant as an alternative energy source at a poultry farm. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(1):97-104 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-1-97-104>

Введение

Альтернативные источники энергии представляют собой важную составляющую в сфере электроэнергетики, а производство электрической энергии с помощью возобновляемых источников энергии (ВИЭ) уступает по результативности лишь газу и углю. Одним из источников ВИЭ является биомасса. В биоэнергетической установке, представляющей собой инженерно-техническую систему, различные отходы сельскохозяйственного производства перерабатываются в биогаз. Подобные установки, позволяющие утилизировать отходы органического происхождения и одновременно удовлетворять локальные энергетические потребности, эксплуатируются в Китае, США, Бразилии, Германии, Индии и т.д. В странах с ограниченным объемом природных топливно-энергетических ресурсов производство биогаза расширяется¹ [1, 2]. Так, 1 м³ биогаза эквивалентен по энергии 0,7...0,8 кг условного топлива, 2 кВт·ч электрической энергии, 1,5 кг каменного угля, 12 кг навозных брикетов, а 1 т (по сухому веществу) биомассы в процессе сбраживания способна дать 350...600 м³ биогаза [3, 4].

Во всех федеральных округах нашей страны есть потенциал использования возобновляемых источников энергии (солнца, ветра, малых ГЭС, биомассы и др.). Годовой потенциал производства биотоплива из биомассы в ближайшие 10 лет может достичь 1,5 млрд т условного топлива, что сопоставимо с годовым объемом потребления природных топливно-энергетических ресурсов – таких, как нефть, уголь и природный газ [1].

Побочные продукты и отходы растениеводства и животноводства составляют значимую часть биомассы^{2,3}. Заслуживают внимания утилизация и переработка отходов животноводства и птицеводства, особенно в условиях повышенной концентрации производства на животноводческих комплексах и птицефабриках. Здесь для производства

биогаза допускается использовать разлагаемые органические субстанции – навоз включая жидкий птичий помет.

Биогазовые технологии актуальны и перспективны для безотходного производства во многих отраслях АПК. В каждом сельскохозяйственном предприятии в том или ином объеме образуются органические отходы, которые можно экологично утилизировать с помощью БЭУ, при этом сократить затраты на энергию и повысить доходность предприятия за счет дополнительной прибыли. Биоэнергетическая установка, помимо тепловой и электрической энергии, позволяет также получить биоудобрения, которые с экономической и экологической точки зрения более выгодны по сравнению с минеральными [2].

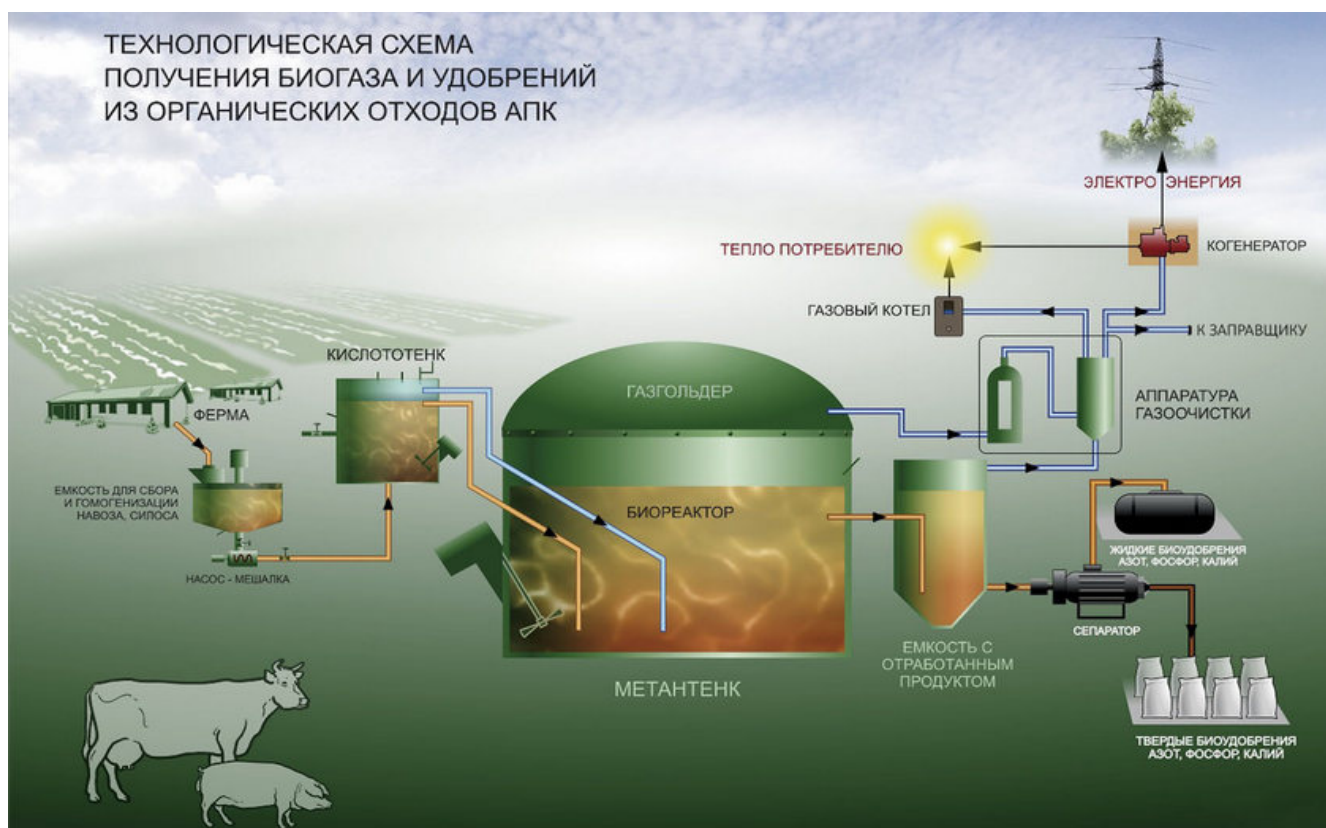
Стандартная БЭУ включает в себя систему подготовки (смешивания) воды и отходов, емкость гомогенизации, загрузчик жидкого сырья в реактор с мешалкой, газгольдер с газовой системой, систему насосов, систему контрольно-измерительных приборов и средств автоматизации процессов с визуализацией. (рис. 1). Субстрат, подогретый до 35...50°C и периодически перемешиваемый, с определенной цикличностью подается через насосную станцию в биореактор – подогреваемый и утепленный резервуар, снабженный миксерами. В результате жизнедеятельности полезных бактерий, питающихся биомассой, в биореакторе образуется биогаз, который скапливается в хранилище (газгольдере). После очистки биогаз направляется к потребителям или в когенерационную установку в качестве топлива для производства электрической и тепловой энергии [5, 6].

Биогазовые технологии реализуются на практике [7, 8], однако выбор рациональной биоэнергетической установки по переработке побочных продуктов животноводства и птицеводства представляет научный и практический интерес.

¹ Биогазовые технологии – новый тренд экономики замкнутого цикла. URL: <https://journal.ecostandard.ru/eco/kontekst/biogazovye-tehnologii-novyy-trend-ekonomiki-zamknutogo-tsikla/> (дата обращения: 01.06.2025).

² Там же

³ Возобновляемая энергетика: официальная статистика от IRENA. [Электронный ресурс]. URL: <http://renen.ru/renewableenergy-official-statistics-from-irena/> (дата обращения: 01.06.2025).



Источник: <https://biogas.su/what-is-biogas/>

Рис. 1. Принципиальная технологическая схема производственного процесса получения биогаза и биоудобрения

Fig. 1. Schematic flow diagram of the production process for biogas and biofertilizer

Цель исследований: представить перспективную технологию по переработке биологических отходов птицеводства; рассчитать проектные технико-экономические показатели БЭУ.

Материалы и методы

На современных птицефабриках объемы биологических отходов производства значительно превышают объемы основной продукции – яиц и мяса птицы. Наибольшую долю отходов составляет птичий помет. Например, за год от курицы-несушки получают порядка 250...300 шт. яиц общей яйцемассой 15...18 кг, за этот же период курица выделяет 55...73 кг помета, а при производстве мяса птицы от бройлеров на каждый килограмм мяса приходится 3 кг помета. Поэтому на птицефабриках объем птичьего помета достигает сотен тысяч тонн, а его утилизация проблематична для многих птицефабрик, поскольку требуются значительные материально-технические, земельные и финансовые ресурсы. Следует отметить, что помет – источник неприятных запахов и выделения ядовитых газов, поэтому при несвоевременной переработке упомянутые отходы являются активным загрязнением атмосферы, почвы, наземных и подземных источников воды. Без соответствующей переработки свежий помет противопоказано применять в качестве удобрения.

Агрофирма «Липецк» (специализация – бройлерное направление), расположенная в селе Кузьминские Отвержки Липецкой области, выращивает зерновые и зернобобовые культуры, производит и реализует мясо птицы и пищевые субпродукты. С целью утилизации биологических отходов птицефабрики ООО агрофирмы «Липецк» инвестиционным проектом предусматривается БЭУ компании «RIELA», функционирующая на основе анаэробной биохимической реакции. Получаемый биогаз преобразуется в тепловую и электрическую энергию в когенерационных блоках мини-ТЭЦ, состоящей из газопоршневых двигателей. При комплектовании мини-ТЭЦ они более предпочтительны, так как отличаются экономичностью, надежностью, простотой в эксплуатации и широким диапазоном электрических мощностей: от 1 кВт до 40 МВт [9].

Биоэнергетическая установка предусматривает комплектацию следующих устройств:

- сектор подготовки субстратов, включающий в себя накопитель помета емкостью 550 м³, набор фекальных насосов, систему переработки падшей птицы, блок приема, перемешивания и гигиенизации субстрата;

- сектор анаэробной биохимической реакции, состоящий из основного биореактора емкостью 4000 м³

с мешалкой, стального ферментера емкостью 1000 м³ с мешалками, двухслойного накопителя биогаза и оборудования очистки биогаза;

– сектор производства тепловой и электрической энергии, предусматривающий мини-ТЭЦ с двумя газопоршневыми установками и блоком управления мощностью 1400 кВт, теплообменник для охлаждения и утилизации тепла от газопоршневой установки;

– сектор разделения отработанного субстрата, включающий в себя накопитель перебродивших остатков, сепаратор сухих веществ, емкость сухих биоудобрений, накопитель жидких биоудобрений.

Предложенный вариант утилизации отходов птицефабрики позволяет получить дополнительную прибыль от переработки всех отходов птицефабрики (птичьего помета и падежа птицы) посредством БЭУ с получением электрической и тепловой энергии, биоудобрений, а также улучшения экологической ситуации на птицефабрике.

Результаты и их обсуждение

В проекте для запуска БЭУ предусматривается подготовка исходного материала, включающего в себя куриный помет в объеме 15987 т в год (49,9%), падеж птицы – 3590 т в год (11,2%), рециркулят – 28470 т в год (38,9%). Проектная технология переработки отходов производства птицефабрики ООО «Агрофирма "Липецк"» по определенной программе включает в себя несколько стадий (рис. 2).

На первой стадии (подготовительной) подразумеваются сбор и перекачивание в блок для приема и смешивания птичьего помета, куда после соответствующей подготовки поступают фрагменты павшей птицы. В результате перемешивания и добавления воды или повторного использования перебродившего субстрата смесь доводится до определенной консистенции (с содержанием сухого вещества не более 20%).

На второй стадии (анаэробного сбраживания) подготовленная смесь должна прокачиваться через внешний пластинчатый теплообменник и в соответствии с заданной программой подвергаться гигиенизации в специальном устройстве, далее, поступая в основной биореактор, равномерно перемешиваться центральной мешалкой. В результате процесса биохимической реакции получается биогаз. Общая продолжительность процесса составляет 20-30 суток. По мере увеличения объема субстрат из биореактора самотеком попадает в ферментер, а выделяемый биогаз по соответствующей программе охлаждается, накапливается и хранится в газгольдере.

Третья стадия (процесс выработки электрической и тепловой энергии) предполагает очистку от влаги,

сернистых и других вредных примесей, подачу его в газопоршневую установку для выработки электроэнергии посредством электрогенератора и получения тепловой энергии путем утилизации тепла от отработанных выхлопных газов. Таким образом, происходит преобразование биогаза в тепловую и электрическую энергию. Настоящую установку можно принять как малую теплоэлектроцентраль (мини-ТЭЦ), включающую в себя внешний теплообменник и электрогенератор.

Четвертая стадия (получение биоудобрения) предполагает перекачивание переработанного в результате биохимической реакции субстрата из ферментера в сепаратор, выделение сухого биоудобрения для разделения субстрата на твердую и жидкую фракции. Твердые биоудобрения подлежат упаковке и складированию, а жидкая фракция перекачивается в емкость для сбора перебродивших остатков, откуда, минуя сепаратор, может повторно направляться в качестве рециркулята в биореактор для поддержания необходимой микрофлоры и температурного баланса биохимического процесса. Работа БЭУ автоматизирована с привлечением цифровых технологий. Контроль за технологическим процессом, узлами и агрегатами БЭУ осуществляют два оператора.

Перебродившая биомасса на выходе из установки представляет собой комплекс биоорганических удобрений, содержащих питательные вещества, микро- и макроэлементы в наиболее доступной для растений форме [10]. Электрическую и тепловую энергию, получаемую на БЭУ, планируется в полном объеме использовать как на собственные нужды самой установки, так и на нужды агрофирмы, что обеспечит снижение расходов потребления электрической и тепловой энергии от региональной энергосистемы и снижение затрат на энергоресурсы.

Ключевые проектные технико-экономические показатели по БЭУ приведены в таблице 1.

В соответствии с проектом требуемый объем инвестиций составит 317,9 млн руб. При этом необходимо учитывать расходы на приобретение технических средств и некоторые виды работ:

- для сектора подготовки субстратов – 48,2 млн руб.;
- для сектора анаэробной биохимической реакции – 71,3 млн руб.;
- для сектора производства тепловой и электрической энергии – 72,3 млн руб.;
- для сектора разделения отработанного субстрата – 42,4 млн руб.;
- изыскательские и проектные работы – 9,7 млн руб.;
- строительно-монтажные работы – 74,0 млн руб.

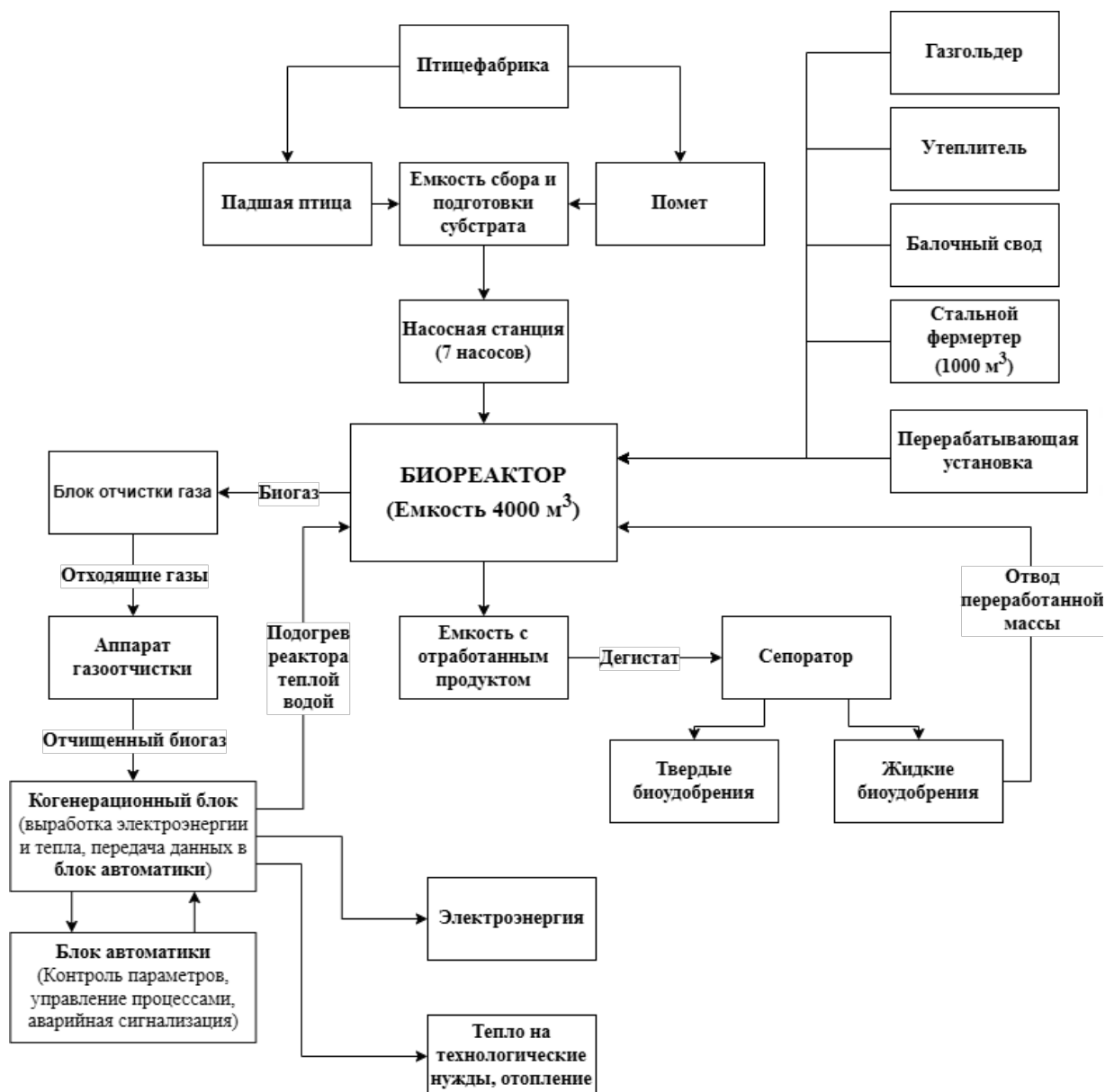


Рис. 2. Проектная технологическая схема переработки отходов производства на птицефабрике ООО «Агрофирма «Липецк»»

Fig. 2. Projected process flow chart for waste processing at the *Agrofirma Lipetsk OOO* poultry farm

Проектные технико-экономические показатели БЭУ

Таблица 1

Projected technical and economic indicators of the BEP

Table 1

Показатель	В среднем за сутки	В среднем за 1 ч работы
Производительность по приемке субстратов – куриного помета, т	43,8	1,8
Производительность по приемке всех субстратов птицефабрики, т	87,8	3,7
Показатели на выходе		
Выход биогаза, м³	15337,9	639,1
Выработка тепловой электроэнергии в мини-ТЭЦ, МВт · ч	33,2	1,4
Выход товарной тепловой энергии, Гкал	2,4	0,1
Выход жидких органических удобрений, т	112,7	4,7
Выход сухих органических удобрений, т	27,3	1,1

Годовые издержки, связанные с эксплуатацией БЭУ, составят 40,1 млн руб.

В результате реализации инвестиционного проекта на птицефабрике планируется получить 15337,9 м³ биогаза, из которого посредством мини-ТЭЦ будет получено за год 12116 МВт·ч товарной электрической и 887 Гкал тепловой энергии, что составляет 70% от выработанного объема энергии, а также произведено биоудобрений в объеме 9964,5 т. Вся энергия, выработанная на мини-ТЭЦ, будет использована в производственных целях при производстве мяса птицы, а биоудобрения – при выращивании продукции растениеводства. Получаемое биоудобрение по своим свойствам универсально и может быть использовано при выращивании любых культур и на разных почвах. Рациональная доза внесения биоудобрений в зависимости от плодородия и выращиваемой культуры составляет от 300 кг до 1 т на 1 га посевной площади.

Следует отметить, что метановое сбраживание позволяет сохранить весь азот в аммонийной или органической формах, фосфор в биоудобрении содержится в виде фосфатов, а калий – в виде растворимых солей, что способствует их усвояемости растениями. Кроме того, биоудобрение содержит необходимый для растений набор микроэлементов, в достаточном количестве присутствуют гуминовые и фуллевые кислоты и их соли. Большое количество кальция в удобрении способствует раскислению почв. Благодаря сепарации перебродившего остатка и выделению сухой фракции более успешно решается проблема транспортировки биоудобрения и хранения до непосредственного внесения.

Кроме этого, на птицефабрике и ее окрестностях ожидается существенное улучшение экологической ситуации⁴.

Расчетную величину производственного эффекта можно определить по формуле:

$$Эп = Ттэ + Тээ + Бу,$$

где Ттэ – стоимостная оценка товарной тепловой энергии, тыс. руб.; Тээ – стоимостная оценка товарной электроэнергии, тыс. руб.; Бу – стоимостная оценка товарного биоудобрения, тыс. руб.

Проектная величина производственного эффекта от сооружения и эксплуатации БЭУ на птицефабрике ООО «Агрофирма «Липецк»» рассчитана на основе исходных показателей, представленных в таблице 2.

Прогнозный производственный эффект, включающий в себя стоимостную оценку получаемой электрической, тепловой энергии и биоудобрения, составит 166,7 млн руб. При этом структура эффекта будет выглядеть следующим образом: электроэнергия – 73,5 млн руб., или 44,0%; тепловая энергия – 28,3 млн руб., или 17,0%; сухие биоудобрения – 64,9 млн руб., или 39,0%.

В связи с тем, что сооружение БЭУ рассматривается как инвестиционный проект, дисконтированные финансовые потоки капитальных вложений, текущих затрат, сопряженных с работой установки, а также ожидаемый чистый доход рассчитывались за период 10 лет. При этом величина дисконта при расчете коэффициента дисконтирования учитывалась в соответствии с прогнозом изменения ключевой ставки Центробанка РФ. Расчеты подтверждают, что чистый дисконтированный доход (ЧДД) от применения БЭУ

Исходные показатели для расчета производственного эффекта

Таблица 2

Initial data for calculating the production effect

Table 2

Показатели	Проектная величина
Среднесуточный объем производства:	
– тепловой энергии (товарной), Гкал·/сут.	2,4
– электрической энергии (товарной), МВт·ч/сут.	33,2
– сухих органических удобрений, т/сут.	27,3
Тариф на тепловую энергию, руб/Гкал	2670,0
Тариф на электроэнергию, руб/кВт·ч	6,45
Цена на биоудобрение (в сухом виде), руб/т	6450,0

⁴ Биогазовые технологии – новый тренд экономики замкнутого цикла. URL: <https://journal.ecostandard.ru/eco/kontekst/biogazovye-tehnologii-novyy-trend-ekonomiki-zamknutogo-tsikla/> (дата обращения: 01.06.2025).

на птицефабрике «Агрофирма "Липецк"» за расчетный период 10 лет достигнет 548,6 млн руб., внутренняя норма доходности (ВНД) составит

0,564, индекс доходности (ИД) будет равен 2,85. При этом срок окупаемости инвестиций составит 4,1 года^{5,6}(табл. 3).

Таблица 3

Прогнозные показатели экономической эффективности применения БЭУ на птицефабрике «Агрофирма "Липецк"» за расчетный период 10 лет

Table 3

Projected economic efficiency indicators for the application of the BEP at the Agrofirma Lipetsk OOO poultry farm over a 10-year calculation period

Показатели	Проектная величина
Дисконтированный объем капитальных вложений, тыс. руб.	314900,0
Ожидаемый чистый доход с учетом коэффициента дисконтирования, тыс. руб.	845812,9
Чистый дисконтированный доход (ЧДД), тыс. руб.	530912,0
Индекс доходности (ИД)	2,85
Дисконтированный срок окупаемости инвестиций, год	4,1

Выводы

1. В результате переработки с помощью БЭУ в течение года куриного помета 15987 т, фрагментов падежа птицы 3590 т и рециркулята (перебродивший субстрат) 12470 т планируется получать ежегодно для

⁵ Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов и их отбору для финансирования (2-я ред., испр. и доп.), утв. Минэкономки РФ Минфином РФ и Госстроем РФ от 21 июня 1999 г. Т DR477. <https://base.garant.ru/2320803/> (дата обращения: 01.06.2025).

⁶ Основные направления единой государственной денежно-кредитной политики Банка России. Электронный ресурс. URL: https://cbr.ru/about_br/publ/ondkp/on_2025_2027 (дата обращения: 01.06.2025)

Список источников

1. Амерханов Р.А., Харченко Д.П., Квитко А.В., Таразанов В.И. Востребованность возобновляемых источников энергии // Сельский механизатор. 2023. № 11. С. 19-21. EDN: CWFHND
2. Попов В.Д., Федоренко В.Ф., Брюханов А.Ю. Приоритеты экологического развития животноводства России и пути их реализации // Техника и оборудование для села. 2020. № 12. С. 2-5. EDN: CDJIGE
3. Апажев А.К., Фиашев Б.А., Фиашев А.Г. и др. Переработка помета и навоза в биогазовых установках // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2023. Т. 70, № 2 (51). С. 100-105. EDN: KILKAI
4. Черноиванов В.И., Толоконников Г.К., Федотов А.В. Биомашсистемы энергосберегающих технологий переработки отходов АПК // Техника и оборудование для села. 2020. № 2 (272). С. 2-7. EDN: EVFZBL
5. Апажев А.К., Шекихачев Ю.А., Дзуганов В.Б. и др. Оптимизация параметров и режимов работы биогазовой установки // Техника и оборудование для села. 2022. № 12 (306). С. 35-39. EDN: VFVQBH
6. Лачуга Ю.Ф., Шогенов Ю.Х., Зиганшин Б.Г. и др. Мобильная биогазовая установка для переработки отходов

производственных нужд 887 Гкал товарной тепловой и 12116 МВт·ч электрической энергии, а также 9964,5 т биоудобрений.

2. Расчеты подтверждают, что чистый дисконтированный доход от применения БЭУ на птицефабрике «Агрофирма "Липецк"» за расчетный период 10 лет составит 548,6 млн руб., индекс доходности – 2,85. При этом значение дисконтированного срока окупаемости инвестиций достигнет 4,1 года.

3. Реализация БЭУ на птицефабрике с применением биогазовой технологии позволит получить положительный экологический эффект за счет безотходной переработки биологических отходов птицеводства.

References

1. Amerkhanov R.A., Kharchenko D.P., Kvitko A.V., Tarazanov V.I. Demand for renewable energy sources. *Selskiy mekhanizator*. 2023;11:19-21. (In Russ.)
2. Popov V.D., Fedorenko V.F., Bryukhanov A.Yu. Priorities for the environmental development of animal husbandry in Russia and ways of their implementation. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2020;12:2-5. (In Russ.)
3. Apazhev A.K., Fiapshev B.A., Fiapshev A.G. et al. Processing of manure in biogas plants. *Electrical Engineering and Electrical Equipment in Agriculture*. 2023;70(2):100-105. (In Russ.)
4. Chernoiivanov V.I., Tolokonnikov G.K., Fedotov A.V. Bio-machine systems of energy-saving technologies for processing agricultural waste. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2020;2:2-7. (In Russ.)
5. Apazhev A.K., Shekikhachev Yu.A., Dzuganov V.B. et al. Optimization of parameters and operating modes of a biogas plant. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2022;12:35-39. (In Russ.)
6. Lachuga Yu.F., Shogenov Yu.Kh., Ziganshin B.G. et al. Mobile biogas plant for processing animal waste. *Bulletin of Agrarian Science*. 2023;3:18-26. (In Russ.)

животноводства // Вестник аграрной науки. 2023. № 3 (102). С. 18-26. EDN: NHGLDA

7. Оськин С.В., Григораш О.В., Коломейцев А.Э. Обоснование применения солнечных электростанций на предприятиях АПК // Техника и оборудование для села. 2024. № 2 (320). С. 37-42. EDN: UNVEFR

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

9. Водяников В.Т., Игудин А.А. Экономические предпосылки формирования собственной энергетической базы крупных сельских товаропроизводителей // Экономика сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий. 2018. № 1. С. 24-29. EDN: YNITC

10. Водяников В.Т. Экономическая оценка реализации биоэнергетических ресурсов отходов сельскохозяйственного производства // Экономика сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий. 2020. № 7. С. 26-31. EDN: MPFJGA

Информация об авторе

Водяников Владимир Тимофеевич, д-р экон. наук, профессор, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; vtvodyannikov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7111-9437>; SPIN-код: 3882-0347

Статья поступила 06.06.2025, после рецензирования и доработки – 16.01.2026; принята к публикации 20.01.2026

7. Oskin S.V., Grigorash O.V., Kolomeitsev A.E. Rationale for the use of solar power plants at agricultural enterprises. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2024;2:37-42. (In Russ.)

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

9. Vodyannikov V.T., Igudin A.A. Economic preconditions for the creation own energy base by large agricultural producers. *Economy of Agricultural and Processing Enterprises*. 2018;1:24-29. (In Russ.)

10. Vodyannikov V.T. Economic assessment of the realization of bioenergy resource of agricultural waste. *Economy of Agricultural and Processing Enterprises*. 2020;7:26-31. (In Russ.)

Author Information

Vladimir T. Vodyannikov, DSc (Econ), Professor; Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation; vtvodyannikov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7111-9437>

Received 06.06.2025; Revised 16.01.2026; Accepted 20.01.2026

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.3

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-1-105-113>

Актуальные направления применения искусственного интеллекта в сельских электрических сетях

А.К. Букреева¹, А.В. Виноградова², А.В. Букреев³, А.В. Виноградов⁴^{1,2,3} Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия⁴ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия¹ anzhelabukreeva@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8582-1080>² alinawin@rambler.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8935-7086>³ vim@aleksey-bukreev.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0209-1167>⁴ winaleksandr@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-8845-9718>

Аннотация. Электрические сети, в том числе сельские, нуждаются в трансформации в связи с декарбонизацией энергетики, интеграцией возобновляемых источников энергии, активным развитием потребителей и повышением требований к надежности и энергоэффективности сетей. Применение искусственного интеллекта (ИИ) при решении проблем энергосистем обусловлено недостаточной эффективностью традиционных методов управления электрическими сетями. Цель исследований – систематический анализ ключевых направлений применения ИИ в электрических сетях, используемых алгоритмов и практических примеров его внедрения, обобщение практического опыта зарубежных и отечественных компаний. В результате обзора отечественных и зарубежных источников, описывающих использование ИИ в электрических сетях, выявлено 4 направления: прогнозирование нагрузки; оптимизация электроэнергетических систем и электрических сетей; поиск неполадок (мониторинг электрооборудования, электрических сетей); оптимальное использование ресурсов в электрических сетях. В рамках данных направлений наиболее эффективными алгоритмами машинного и глубокого обучения являются LSTM, GRU, SVM и CNN, а также метаэвристические методы. Примеры практического использования искусственного интеллекта демонстрируют разнонаправленность применения технологий ИИ в зависимости от особенностей национальных энергосистем. В странах с высокой долей возобновляемых источников энергии акцент смещен на прогнозирование нагрузки, в России – на автоматизацию мониторинга и диагностики протяженных сельских электрических сетей с использованием компьютерного зрения и БПЛА. Искусственный интеллект может служить инструментом для создания «Умных сетей» (Smart Grid), его применение позволит провести цифровую трансформацию электрических сетей, повысить их эффективность, устойчивость и адаптивность. Однако внедрение ИИ сопряжено с необходимостью решения задач надежности, кибербезопасности и понимания выбора, принимаемого автоматикой.

Ключевые слова: электрические сети; искусственный интеллект; ИИ; использование ИИ в электрических сетях; Smart Grid; мониторинг; прогнозирование; оптимизация электроэнергетических систем

Для цитирования: Букреева А.К., Виноградова А.В., Букреев А.В., Виноградов А.В. Актуальные направления применения искусственного интеллекта в сельских электрических сетях // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 1. С. 105-113. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-1-105-113>

ORIGINAL ARTICLE

Current applications of artificial intelligence in rural power grids

A.K. Bukreeva¹, A.V. Vinogradova², A.V. Bukreev³, A.V. Vinogradov⁴^{1,2,3} Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Moscow, Russia⁴ Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia¹ anzhelabukreeva@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8582-1080>² alinawin@rambler.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8935-7086>³ vim@aleksey-bukreev.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0209-1167>⁴ winaleksandr@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-8845-9718>

Abstract. The evolving energy landscape, characterized by decarbonization, the integration of renewable energy sources (RES), and the growing demand for grid reliability and energy efficiency, necessitates a profound

transformation of power grids, particularly in rural areas. Conventional methods of power grid management often prove insufficient for these challenges, driving the adoption of artificial intelligence (AI) solutions. This study provides a systematic analysis of key AI applications in power grids, examining the algorithms employed and practical implementation examples from both international and domestic contexts. Drawing on a comprehensive review of literature, the authors have identified four primary application areas: load forecasting, power system and grid optimization, fault detection and equipment monitoring, and optimal resource management within power grids. Within these domains, effective algorithms include deep learning techniques such as LSTM, GRU, and CNN, along with machine learning models like SVM and various metaheuristic methods. Practical examples highlight the diverse deployment of AI, adapting to national power system specificities. For instance, countries with a high share of renewable energy sources (RES) often prioritize AI for load forecasting, while in Russia, the focus is on automating the monitoring and diagnostics of extensive rural grids through computer vision and UAVs. AI is instrumental in the design of Smart Grids, enabling the digital transformation of power infrastructure to enhance efficiency, resilience, and adaptability. However, successful AI integration requires addressing challenges related to reliability, cybersecurity, and the explainability of automation-driven decision-making.

Keywords: power grids; artificial intelligence; AI; the use of AI in power grids; Smart Grid; monitoring; forecasting; optimization of electric power systems

For citation: Bukreeva A.K., Vinogradova A.V., Bukreev A.V., Vinogradov A.V. Current applications of artificial intelligence in rural power grids. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(1):105-113 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-1-105-113>

Введение

Современные электрические сети, в том числе сельские, переживают период трансформации, движимой декарбонизацией энергетики, интеграцией распределенных возобновляемых источников энергии (ВИЭ), появлением активных потребителей, необходимостью повышения надежности и энергоэффективности. Традиционные методы контроля и управления электрическими сетями в этих условиях становятся недостаточно эффективными [1]. Искусственный интеллект (ИИ) и, в частности, методы машинного обучения и глубокого обучения, предлагают мощный инструментарий для анализа огромных объемов данных (Big Data), генерируемых системами SCADA¹, PMU², датчиками онлайн-мониторинга, системами учета и геоинформационными системами [2, 3]. ИИ способен выявлять сложные закономерности, строить предиктивные модели и оптимизировать решения в реальном времени, что открывает новые возможности для создания «Умных сетей» (Smart Grid). В научных публикациях, на российских и международных форумах, выставках и конференциях обсуждаются вопросы стратегических ориентиров и экономических аспектов развития отрасли, рассматриваются практические требования к внедрению технологий интеллектуализации [4, 5]. Изучение накопленного опыта

применения ИИ в электрических сетях и его систематизация представляются актуальной задачей.

Цель исследований: систематический анализ ключевых направлений применения ИИ в электрических сетях, используемых алгоритмов и практических примеров его внедрения, обобщение практического опыта зарубежных и отечественных компаний.

Материалы и методы

Обзор отечественных и зарубежных источников, входящих в базы РИНЦ, Web of Science, Scopus и др., позволил выявить основные компании, разрабатывающие и внедряющие ИИ в электрических сетях, и провести сравнительный анализ использования в них технологий ИИ. Особое внимание уделено применяемым методам использования ИИ в научных исследованиях, практике проектирования и эксплуатации электрических сетей. Выявлены наиболее ценные подходы, применимые к сельским электрическим сетям.

Результаты и их обсуждение

Использование ИИ в электрических сетях в настоящее время сосредоточено в четырех ключевых направлениях (рис. 1).

В области прогнозирования нагрузки используются современные алгоритмы машинного обучения для высокоточного кратко-, средне- и долгосрочного прогнозирования потребления электроэнергии и ее выработки солнечными и ветровыми электростанциями, что критически важно для балансировки

¹ SCADA – программно-аппаратный комплекс для диспетчерского управления и сбора данных в реальном времени.

² PMU – *англ.* Phasor Measurement Unit – фазорный измерительный блок (фазоры).

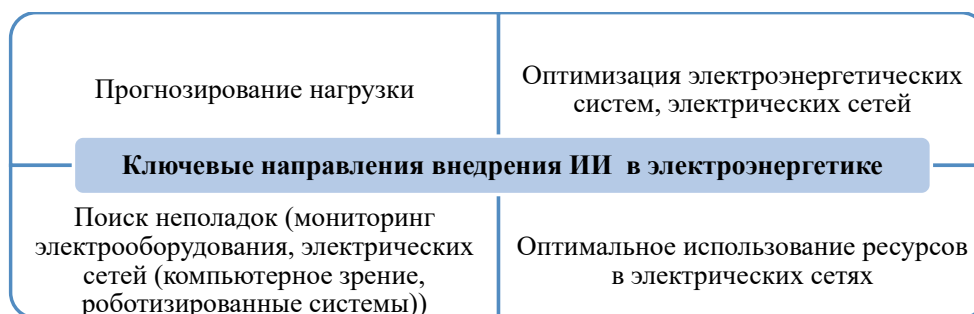


Рис. 1. Ключевые направления использования ИИ в электрических сетях

Fig. 1. Key areas of AI use in power grids

системы и планирования режимов сетей, к которым подключены как потребители, так и электростанции на основе ВИЭ [6]. Для решения этой задачи применяются модели на основе рекуррентных нейронных сетей – такие, как LSTM³ и GRU⁴, а также ансамбли деревьев решений и гибридные подходы. Например, в работе [7] описывается гибридная модель, сочетающая архитектуру LSTM и RNN⁵, с применением метода отбора признаков и генетического алгоритма для оптимизации параметров в рамках задачи краткосрочного прогнозирования нагрузки (STLF). Особое внимание в этой работе уделяется влиянию сезонных факторов, в том числе метеорологических. Результаты исследований показали преимущество гибридных моделей над традиционными искусственными нейронными сетями.

Для автоматического выбора ключевых параметров модели прогноза нагрузки предложен подход, сочетающий многомасштабную архитектуру LSTM с метаэвристическими (высокоуровневыми, обобщенными стратегиями поиска решений), генетическим алгоритмом и оптимизацией роя частиц [8], что позволило превзойти по точности традиционные методы включая SVR⁶, Random Forest⁷ и ANN⁸. В исследовании [9] для прогнозирования электропотребления использовались многослойные перцептроны, показавшие удовлетворительную точность, однако выявленные выбросы погрешности указывают на необходимость дальнейшей оптимизации таких моделей.

³ LSTM (англ. Long Short-Term Memory) – долгая краткосрочная память.

⁴ GRU (англ. Gated Recurrent Unit) – закрытый рекуррентный блок.

⁵ RNN (англ. Recurrent neural network) – рекуррентная нейронная сеть.

⁶ SVR (англ. Support Vector Regression) – регрессия опорных векторов.

⁷ Random Forest – «случайный лес», алгоритм случайного леса.

⁸ ANN (англ. Artificial Neural Network) – искусственная нейронная сеть.

Особенности нагрузок сельских электрических сетей заключаются в специфических графиках нагрузки, их сезонности по времени суток и месяцам года. В связи с изменениями в технологиях содержания животных, обработке и сушке зерна, других продуктов растениеводства типовые графики нагрузки, приведенные в нормах технологического проектирования систем электроснабжения сельских потребителей, не всегда применимы и требуют коррекции. Эту коррекцию можно выполнять с использованием ИИ. Наиболее адаптированными для прогнозирования электрических нагрузок в сельских электрических сетях являются методы, приведенные в работах [6, 7], особенно для тех сетей, где активно развивается распределенная генерация на основе ВИЭ.

Оптимизация электроэнергетических систем и электрических сетей достигается за счет внедрения комплексных подходов, сочетающих технические и организационные меры повышения эффективности, надежности и устойчивости энергосистем [10]. Ключевыми направлениями являются математическое моделирование и алгоритмы оптимизации включая методы линейного и нелинейного программирования, а также вероятностный анализ для управления нестабильностью, вызванной возобновляемыми источниками энергии. В монографии [11] рассматривается применение классических генетических алгоритмов и других современных методов машинного обучения включая искусственные нейронные сети и машины опорных векторов для повышения быстродействия, надежности и адаптивности систем защиты. Разработка специализированной платформы eGridGPT⁹, демонстрирующей возможность интеграции генеративного ИИ с цифровыми двойниками и мультиагентными системами для создания комплексных систем поддержки операторов, излагается в статье [12]. Использование

⁹ Electric Grid Generative Pretrained Transformer – электро-сетевой генераторный трансформатор с предварительной подготовкой.

современных технологий Smart Grid, ИИ и нейросетей способствует автоматическому мониторингу и оптимизации работы энергосетей с учетом растущей сложности и интеграции возобновляемых источников энергии [13]. Важным технологическим трендом являются граничные вычисления Edge Computing и облачные технологии, которые организуют распределенную обработку данных в реальном времени непосредственно около источника генерации [14].

Сельские электрические сети в настоящее время слабо оснащены средствами автоматизации, управления конфигурацией. В то же время происходит активное внедрение систем распределенной автоматизации на базе применения реклоузеров, управляемых разъединителей, указателей токов короткого замыкания и другого оборудования в сетях 10 кВ. Использование указанных в источнике [12] методов создания цифровых двойников позволит выполнять предварительное моделирование сетей для рационального построения распределенной автоматизации.

Рост количества и мощности источников генерации на основе ВИЭ, подключаемых к российским сельским электрическим сетям, требует соответствующей адаптации сетей, и здесь могут быть полезными результаты исследований применения ИИ и интеллектуальных технологий в энергетике [11, 13, 14].

Для поиска неполадок (мониторинга электрооборудования, электрических сетей) с помощью компьютерного зрения, роботизированных систем применяются алгоритмы машинного обучения, посредством которых анализируют данные, получаемые средствами измерения параметров виброакустики, частичных разрядов, термографии, газового состава масла, токов и напряжений, контролируемых в различных точках сети и на электрооборудовании. Это позволяет обеспечить раннее обнаружение аномалий и прогнозировать остаточный ресурс оборудования [15, 16].

Использование современных методов классификации данных – таких, как SVM¹⁰, деревья решений и нейронные сети для обработки сигналов токов и напряжений от релейной защиты и автоматики, и фазорного измерительного блока обеспечивают высокоточное и оперативное определение координат повреждений на линиях электропередачи (ЛЭП), характер аварийного режима [17]. Разработке и апробации методов классификации коммутационных и грозовых

перенапряжений в электроэнергетических системах с использованием искусственных нейронных сетей посвящена статья [18]. Методология включала в себя моделирование переходных процессов, автоматизацию параметрического анализа и последующую обработку данных для выделения характерных признаков перенапряжений, что открывает возможность для создания интеллектуальных систем защиты и автоматики, способных оперативно классифицировать возмущения. Результаты, приведенные в работах [17, 18], применимы для сельских электрических сетей, отличающихся повышенной протяженностью и более подверженных последствиям грозовой активности.

Для оптимального использования ресурсов в электрических сетях ИИ применяет алгоритмы прогнозирования гибкости спроса и оптимизации программ управления спросом (DSM/DR)¹¹. Эти технологии анализируют огромные объемы данных об энергопотреблении, выявляют закономерности и оптимизируют тактику реагирования на спрос в режиме реального времени¹². Интеграция интеллектуальных электронных устройств, датчиков и систем двусторонней связи позволяет повысить надежность электроснабжения, качество электроэнергии и эффективность управления сетью включая интеграцию возобновляемых источников энергии и систем накопления [19]. Основное внимание уделяется архитектуре сетей связи включая глобальные, полевые и соседские сети с ключевыми требованиями по задержке, доступности, взаимодействию и кибербезопасности. Анализируются как лицензированные, так и нелицензированные решения, включая сотовые технологии и специализированные беспроводные сети для оценки их применимости в задачах автоматического восстановления питания, мониторинга состояния сети и управления напряжением. Коммуникационные технологии [19] являются актуальными для сельских электрических сетей в связи с развитием в них распределенной генерации на основе ВИЭ, особенно в вопросах организации связи между элементами генерации и оборудованием сети, диспетчерскими пунктами.

Мировой и отечественный опыт демонстрирует активное внедрение технологий ИИ ведущими энергетическими компаниями, при этом наблюдаются

¹⁰ SVM (англ. Support Vector Machine) – метод опорных векторов.

¹¹ DSM (англ. Demand Side Management) – стратегия управления спросом на электроэнергию; DR (Demand Response) – реагирование на спрос.

¹² Перспективы рынка Demand Response на период с 2024 по 2034 год. URL: <https://www.futuremarketinsights.com/ru/reports/demand-response-market> (дата обращения: 18.08.2025)

Таблица

Сравнительный анализ практического использования технологий искусственного интеллекта в электрических сетях

Table

Comparative analysis of the practical use of artificial intelligence technologies in power grids

Направление внедрения ИИ	Компания (страна)/	Реализация и технологии	Ключевые результаты и особенности
1	2	3	4
Прогнозирование нагрузки	Enel (Италия)	Алгоритмы машинного обучения, цифровая платформа управления энергосистемами ¹³	Прогнозирование выработки ВИЭ, оптимизация работы сети в условиях нестабильности
	ABB (Швейцария)	Специализированный алгоритм на основе комплексного анализа исторических данных и внешних факторов, статистические модели ¹⁴	Прогнозирование незапланированных пиков потребления, предотвращение аварий, автоматическое уведомление
	KEPCO (Япония)	ИИ-алгоритмы для анализа оперативных данных и истории обслуживания ¹⁵	Снижение простоев оборудования, продление ресурса, оптимизация эксплуатационных затрат
Оптимизация электроэнергетических систем, электрических сетей	National Grid ESO (Великобритания)	Система широкомасштабного мониторинга напряжения (WAMS) ¹⁶	Мониторинг напряжения и стабильности сети в реальном времени, распознавание предвестников сбоев
	General Electric (США)	Программная платформа промышленного IoT Predix (машинное обучение, анализ больших данных) ¹⁷	Экосистема для разработки приложений: оптимизация операционной деятельности, предиктивное обслуживание, управление активами
	PJM Interconnection (США)	Методы ИИ для автоматизированной обработки данных ¹⁸	Автоматизация обработки заявок на подключение, стандартизация и воспроизводимость процесса
Поиск неполадок (мониторинг электрооборудования, электрических сетей (компьютерное зрение, роботизированные системы))	China Southern Power Grid (Китай)	Комплекс камер, дронов и шагающих роботов ¹⁹	Оперативная проверка подстанций, повышение эффективности и скорости задач
	Россети Центр (Россия)	Программно-аппаратный комплекс на основе сверточных нейронных сетей [20]	Семантическая сегментация данных аэрофотосъемки, автоматическое выявление 41 типа дефектов на ЛЭП. Снижение трудоемкости на 64%, рост производительности на 84%
	Лаборатория Будущего (Россия)	Комплекс «Канатоход» (БПЛА), нейросеть YOLO v3 ²⁰ , алгоритмы машинного зрения (Canny, Hough Line, GrabCut) [21, 22]	Диагностика с посадкой на провод ЛЭП, идентификация угла наклона опор, выявление дефектов
	Подстанция «Курдюм» (Россия)	Высокоавтоматизированный комплекс на базе БПЛА с тепловизионным, аудио- и визуальным контролем ²¹	Круглосуточный мониторинг оборудования и ЛЭП, исключение высотных работ

¹³ Enel. Digital Transformation in Energy: Enel's Approach. (2022). URL: <https://www.enel.com/co/en/the-companies/enel-group.html> (дата обращения: 20.08.2025).

¹⁴ АББ использует AI для революции в управлении энергией. URL: <https://ru.dsolar.com/news/abb-uses-ai-to-revolutionize-energy-management-28963525.html> (дата обращения: 20.08.2025).

¹⁵ Smart Grids and Beyond: KEPCO's AI Revolution in Energy Management URL: <https://www.cash-platform.com/smart-grids-and-beyond-kepcos-ai-revolution-in-energy-management> (дата обращения: 20.08.2025).

¹⁶ Lundin B.V. National Grid ESO Deploys ML-based Inertia Forecasting. Eepower. 2022. Apr 18. URL: <https://eepower.com/news/national-grid-eso-deploys-ml-based-inertia-forecasting> (дата обращения: 20.08.2025).

¹⁷ GE Digital Launches Next-Gen Predix platform to accelerate industrial IoT transformation. URL: https://www.dcsmodule.com/blog/ge-digital-launches-next-gen-predix-platform-to-accelerate-industrial-iot-transformation_b153 (дата обращения: 18.08.2025).

¹⁸ Kearney L. Google deploys AI to speed up connections at PJM, largest US power grid. April 10, 2025. URL: <https://finance.yahoo.com/news/google-deploys-ai-speed-connections-090627379.html> (дата обращения: 22.08.2025).

¹⁹ В Китае начали внедрять ИИ для проверки электроподстанций. URL: https://news.rambler.ru/world/52421720/?utm_content=news_media&utm_medium=read_more&utm_source=copylink (дата обращения: 19.08.2025).

²⁰ YOLO (англ. You Only Look Once) – алгоритм обнаружения объектов в реальном времени.

²¹ Россети ФСК ЕЭС впервые внедрили технологию машинного зрения в сетевом комплексе РФ // Новости энергетики. 2021. 27 мая. URL: <https://novostienergetiki.ru/rosseti-fsk-ees-vpervye-vnedrili-texnologiyu-mashinnogo-zreniya-v-setevom-komplekse-rf> (дата обращения: 22.08.2025).

Окончание табл. 3

1	2	3	4
Оптимальное использование ресурсов в электрических сетях	Россети (Россия)	Система «Цифровой РЭС. Интеллект» (машинное обучение, экспертные системы, оптимизация) ²²	Анализ оперативной обстановки, предложение действий при авариях, прогнозирование, формирование схем восстановления питания
	Тулэнерго (Россия)	Проект «Цифровой двойник ВЛ» (ML-модели) ²³	Прогнозирование аварийности, оптимизация распределения ремонтных бригад (учет истории отказов, погоды, нагрузки)
	Mail.ru Group / Россети Центр (Россия)	Программный комплекс на базе машинного обучения ²⁴	Прогнозирование и выявление коммерческих потерь через интегральный анализ гетерогенных данных
	Геоскан / Цифра (Россия)	Комплексные решения: мониторинг с помощью дронов («Геоскан») ²⁵ и глубокий анализ данных («Цифра») ²⁶	Анализ нагрузки, прогнозирование пиков, оптимальное распределение энергии, автоматический анализ фотографий для выявления дефектов

как общие тенденции, так и специфические акценты в подходах (табл.).

Анализ данных таблицы 1 свидетельствует о том, что в разных странах акценты практического применения технологий искусственного интеллекта в электрических сетях отличаются и связаны в первую очередь с особенностями энергосистем и электрических сетей этих стран. При значительной доле использования ВИЭ в энергосистеме возрастает значимость применения ИИ для прогнозирования нагрузки (Италия, Великобритания, ряд других стран).

В России основной акцент делается на поиске неполадок (мониторинг электрооборудования, электрических сетей с помощью компьютерного зрения и роботизированных систем), связанных с выявлением дефектов опор, проводов, степенью зарастания трасс ЛЭП и т.п. Это обусловлено высокой протяженностью сетей, в первую очередь – сельских, с большим объемом трудозатрат на осмотры ЛЭП, их обслуживание. Российская электроэнергетика активно осваивает технологии применения ИИ, преимущественно в рамках стратегий цифровой трансформации крупных сетевых компаний, с основным фокусом на повышение надежности, эффективности эксплуатации и безопасности, демонстрируя высокие темпы развития и создавая прочную

основу для будущего масштабирования решений на базе ИИ.

Полноценная интеграция ИИ в электрические сети сопряжена с трудностями. Энергосистемы становятся слишком сложными. При использовании элементов ИИ должны выполняться важные условия: надежность, безопасность и объяснимость решений нейросетей и ИИ, кибербезопасность. Важно, чтобы алгоритмы не ошибались в критических ситуациях; должно быть понимание диспетчеров сети того, почему автоматика приняла то или иное решение, иначе ей нельзя доверять. Чтобы энергосистема правильно работала, необходимо предусмотрительное внедрение ИИ во всех сферах энергетики.

Перспективными являются такие направления, как: «Умные энергорынки», в которых ставки и цены назначаются на основе прогнозов; самообучающиеся сети с постоянной оптимизацией своей конфигурации; автоматизированное долгосрочное планирование развития инфраструктуры. Среди отечественных разработок можно выделить исследование [23], в котором предлагается структура сбора, хранения и обработки данных для интеллектуальных электрических сетей с управляемой конфигурацией, включающей в себя решение задач мониторинга, прогнозирования и управления, в том числе стратегического.

²² Компания «Цифровой РЭС». URL: <https://цифровойрэс.рф> (дата обращения: 20.08.2025).

²³ В «Тулэнерго» внедряют проект «Цифровой двойник» // Россети Центр и Приволжье. 2024. 6 марта. URL: https://mrsk-cp.ru/press/company_news/V-Tulenergo-vnedrayut-proekt-TSifrovoy-dvoynik-/?sphrase_id=405580 (дата обращения: 18.08.2025).

²⁴ Mail.ru Group помогла «Россети Центр» сократить коммерческие потери электроэнергии с помощью ИИ. 2021. 17 марта. URL: <https://tech.vk.com/news/80/mailru-group-pomogla-rosseti-tsentr-sokratit-kommercheskie-poteri-elektroenergii-s-pomoshchyu-ii> (дата обращения: 18.08.2025).

²⁵ Компания «Геоскан». URL: <https://www.geoscan.ru/ru> (дата обращения: 22.08.2025).

²⁶ Компания «Цифра». URL: <https://www.zyfra.com/ru> (дата обращения: 22.08.2025).

Таким образом, ИИ является критически важным инструментом для цифровой трансформации электрических сетей, обеспечивающим повышение ее эффективности, устойчивости и адаптивности.

Выводы

1. Искусственный интеллект в электрических сетях, в том числе сельских, применяется для прогнозирования нагрузки, оптимизации электроэнергетических систем, электрических сетей, поиска неполадок (мониторинг электрооборудования, электрических сетей), оптимального использования ресурсов в электрических сетях.

Список источников

1. Gungor V.C., Sahin D., Kocak T. et al. Smart grid technologies: Communication technologies and standards. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2011;7(4):529-539. <https://doi.org/10.1109/TII.2011.2166794>
2. Егоров А.А. Тенденции мирового рынка информационных технологий в энергетике (умный мониторинг, цифровые двойники, компьютерное зрение, искусственный интеллект). Ч. 1 // Автоматизация и ИТ в энергетике. 2022. № 12 (161). С. 8-24. EDN: DUNVQX
3. Мозохин А.Е., Шведенко В.Н. Анализ направлений развития цифровизации отечественных и зарубежных энергетических систем // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19, № 4. С. 657-672. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2019-19-4-657-672>
4. Ляндау Ю.В., Темирбулатов А.У. Обзор применения технологий искусственного интеллекта в электроэнергетической отрасли // Инновации и инвестиции. 2023. № 8. С. 304-309. EDN: JSFZIM
5. Никифоров И.К. Перспективы развития электроэнергетических сетей в виде мультиагентных систем // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2022. № 2. С. 13-21. EDN: DBMISF
6. Hong T., Fan S. Probabilistic electric load forecasting: A tutorial review. *International Journal of Forecasting*. 2016;32(3):914-938. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2015.11.011>
7. Islam B., Shams F.A. Short-term electrical load demand forecasting based on LSTM and RNN deep neural networks. *Mathematical Problems in Engineering*. 2022. Vol. 2022. Article ID2316474. <https://doi.org/10.1155/2022/2316474>
8. Bouktif S., Fiaz A., Ouni A., Serhani M.A. Multi-sequence LSTM-RNN deep learning and metaheuristics for electric load forecasting. *Energies*. 2020;13(2):391. <https://doi.org/10.3390/en13020391>
9. Бершадский И.А., Джура С.Г., Чурсинова А.А. Использование искусственного интеллекта для прогнозирования электропотребления энергосбытовой компании // Научный вестник НГТУ. 2020. Т. 80, № 4. С. 7-16. <https://doi.org/10.17212/1814-1196-2020-4-7-16>
10. Аллаев К.Р., Холиддинов И.Х., Холиддинова М.М.к. Методология оценки эффективности электрических сетей с использованием нечеткой логики // Электричество. 2025. № 2. С. 4-14. <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2025-2-4-14>
11. Almoataz Y., Abdelaziz, Shady H.E., Abdel A., Anamika Y. Artificial intelligence applications in electrical transmission and distribution systems protection. CRC Press. 2021. 512 p. <https://doi.org/10.1201/9780367552374>

2. Наиболее эффективными алгоритмами машинного и глубокого обучения являются LSTM, GRU, SVM и CNN, а также метаэвристические методы.

3. Применение технологий ИИ зависит от особенностей национальных энергосистем: в странах с высокой долей ВИЭ акцент смещен на прогнозирование нагрузки, в России – на автоматизацию мониторинга и диагностику протяженных сельских электрических сетей с использованием компьютерного зрения и БПЛА.

4. Внедрение ИИ требует решения вопросов надежности, кибербезопасности и возможности понять, как ИИ пришел к тому или иному решению.

References

1. Gungor V.C., Sahin D., Kocak T., Ergut S., Buccella C., Cecati C., Hancke G.P. Smart grid technologies: Communication technologies and standards. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2011;7(4):529-539. <https://doi.org/10.1109/TII.2011.2166794>
2. Egorov A.A. Trends in the world market of information technologies in the energy industry (smart monitoring, digital twins, computer vision, artificial intelligence). Part 1. *Avtomatizatsiya i IT v energetike*. 2022;12:8-24. (In Russ.)
3. Mozokhin A.E., Shvedenko V.N. Digitization development directions of national and foreign energy systems. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2019;4:657-672. (In Russ.) <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2019-19-4-657-672>
4. Lyandau Yu.V., Temirbulatov A.U. Overview of the application of artificial intelligence technologies in the electric power industry. *Innovations & Investment*. 2023;8:304-309. (In Russ.)
5. Nikiforov I.K. Prospects for the development of electric power networks in the form of multi-agent systems. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol, diagnostika*. 2022;2:13-21. (In Russ.) <https://doi.org/10.25791/pribor.2.2022.1321>
6. Hong T., Fan S. Probabilistic electric load forecasting: A tutorial review. *International Journal of Forecasting*. 2016;32(3):914-938. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2015.11.011>
7. Islam B., Shams F.A. Short-term electrical load demand forecasting based on LSTM and RNN deep neural networks. *Mathematical Problems in Engineering*. 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/2316474>
8. Bouktif S., Fiaz A., Ouni A., Serhani M.A. Multi-sequence LSTM-RNN deep learning and metaheuristics for electric load forecasting. *Energies*. 2020;13(2):391. <https://doi.org/10.3390/en13020391>
9. Bershadsky I.A., Dzhura S.G., Chursinova A.A. The use of artificial intelligence to predict electric power consumption of a power supply company. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*. 2020;80(4):7-16. (In Russ.) <https://doi.org/10.17212/1814-1196-2020-4-7-16>
10. Allaev K.R., Kholiddinov I.Kh., Kholiddinova M.M.k. Electric network performance assessment methodology using fuzzy logic. *Elektrichestvo*. 2025;2:4-14. (In Russ.) <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2025-2-4-14>
11. Almoataz Y., Abdelaziz, Shady H.E., Abdel A., Anamika Y. Artificial intelligence applications in electrical transmission and distribution systems protection. CRC Press. 2021. 512 p. <https://doi.org/10.1201/9780367552374>

12. Choi S.L. et al. Generative AI for power grid operations Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-5D00-91176. 2024. <https://www.nrel.gov/docs/fy25osti/91176.pdf>
13. Varganova A.V., Khrumshin V.R., Radionov A.A. Improving efficiency of electric energy system and grid operating modes: Review of optimization techniques. *Energies*. 2022;15(19):7177. <https://doi.org/10.3390/en15197177>
14. Массель Л.В. Современный этап развития искусственного интеллекта и применение методов и систем ИИ в энергетике // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2021. № 4 (24). С. 5-20. <https://doi.org/10.38028/ESI.2021.24.4.001>
15. Zhang X., Zhang M., Hu Q. Research on the application of artificial intelligence in operation and maintenance for power equipment. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020;617(1):012001. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/617/1/012001>
16. Виноградов А.В. Управление конфигурацией как концепция развития сельских электрических сетей 0,4 кВ // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2024. Т. 71, № 4 (57). С. 65-72. <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2024-71-4-65-72>
17. Иванов С.О., Никандров М.В., Славутский Л.А. Оценка статистических характеристик срабатывания защиты на основе нейронной сети прямого распространения // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2023. № 9. С. 26-31. EDN: BNYRTI
18. Mehinovic A., Grebović S., Fejzić A. et al. Application of artificial intelligence methods for determination of transients in the power system. *Electric Power Systems Research*. 2023;223:109634. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109634>
19. Большев В.Е., Виноградов А.В. Перспективные коммуникационные технологии для автоматизации сетей электроснабжения // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2019. Т. 11, № 2 (42). С. 65-82. EDN: LQLOZP
20. Микрюков В.В., Пацев А.А., Середкин О.А. и др. Применение нейронных сетей для интеллектуального анализа состояния воздушных линий электропередачи с использованием беспилотных воздушных судов // Электроэнергия. Передача и распределение. 2024. № 6 (87). С. 106-109. EDN: UHARWI
21. Лимановская О.В., Титов Е.А., Волкова Д.И., Лемех А.В. Алгоритм определения наклона опор ЛЭП методами глубокого обучения по видеоданным // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2020. № 2. С. 72-80. <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2020.2.072-080>
22. Астапова М.А., Лебедев И.В. Обзор подходов к детектированию дефектов элементов ЛЭП на изображениях в инфракрасном, ультрафиолетовом и видимом спектрах // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2020. Т. 8, № 4 (31). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2020.31.4.036>
23. Виноградов А.В., Моренко К.С. Структура системы сбора, хранения и обработки данных для управления конфигурацией электрической сети // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2025. Т. 72, № 3. С. 38-45. <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2025-72-3-38-45>
12. Choi S.L. et al. Generative AI for power grid operations Golden, CO: *National Renewable Energy Laboratory*. NREL/TP-5D00-91176. 2024. <https://www.nrel.gov/docs/fy25osti/91176.pdf>
13. Varganova A.V., Khrumshin V.R., Radionov A.A. Improving efficiency of electric energy system and grid operating modes: Review of optimization techniques. *Energies*. 2022;15(19):7177. <https://doi.org/10.3390/en15197177>
14. Massel L.V. Modern stage of artificial intelligence (AI) development and application of AI methods and systems in power engineering. *Information and Mathematical Technologies in Science and Management*. 2021;4(24):5-20. (In Russ.) <https://doi.org/10.38028/ESI.2021.24.4.001>
15. Zhang X., Zhang M., Hu Q. Research on the application of artificial intelligence in operation and maintenance for power equipment. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020;617(1):012001. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/617/1/012001>
16. Vinogradov A.V. Configuration management as a concept for developing 0.4 kV rural electric grids. *Electrical Engineering and Electrical Equipment in Agriculture*. 2024;4(57):65-72. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2024-71-4-65-72>
17. Ivanov S.O., Nikandrov M.V., Slavutskij L.A. The statistical characteristics evaluation of protection operation based on a feed forward neural network. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol, diagnostika*. 2023;9:26-31. (In Russ.)
18. Mehinovic A., Grebović S., Fejzić A. et al. Application of artificial intelligence methods for determination of transients in the power system. *Electric Power Systems Research*. 2023;223:109634. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109634>
19. Bolshev V.E., Vinogradov A.V. Perspective communication technologies for distribution automation. *Vestnik kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2019;2(42):65-82. (In Russ.)
20. Mikryukov V.V., Patsev A.A., Seredkin O.A. et al. Neural network application for smart analysis of overhead transmission line's condition with the use of UAVs. *Electric Power: Transmission and Distribution*. 2024;6(87):106-109. (In Russ.)
21. Limanovskaya O.V., Titov E.A., Volkova D.I., Lemekh A.V. Algorithm for determining the tilt of support of electric power supplies by methods of deep learning with video data. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2020;2:72-80. (In Russ.) <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2020.2.072-080>
22. Astapova M.A., Lebedev I.V. Review of approaches to the detection of defects in power transmission line elements in images in the infrared, ultraviolet and visible spectra. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2020;8(4). (In Russ.) <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2020.31.4.036>
23. Vinogradov A.V., Morenko K.S. Database structure for managing the configuration of a conceptual electrical grid. *Electrical Engineering and Electrical Equipment in Agriculture*. 2025;3(60):38-45. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2025-72-3-38-45>

Информация об авторах

- ¹ **Букреева Анжела Канвеевна**, канд. тех. наук, старший научный сотрудник; anzhelabukreeva@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8582-1080>; SPIN-код: 4079-4380, AuthorID: 1039558
- ² **Виноградова Алина Васильевна**, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник; alinawin@rambler.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8935-7086>; SPIN-код: 8836-8684, AuthorID: 717846
- ³ **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
- ⁴ **Виноградов Александр Владимирович**, д-р техн. наук, доцент, профессор; winaleksandr@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-8845-9718>; SPIN-код: 6652-9426, AuthorID: 690615
- ^{1, 2, 3} Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5
- ⁴ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Вклад авторов

А.К. Букреева – концептуализация, проведение исследований, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;

А.В. Виноградова – формальный анализ, администрирование данных;

А.В. Букреев – формальный анализ, создание черновика рукописи;

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

Конфликт интересов

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

Статья поступила 23.10.2025, после рецензирования и доработки 15.01.2026; принята к публикации 19.01.2026

Author Information

- Anzhela K. Bukreeva**¹, CSc (Eng), Senior Research Engineer; anzhelabukreeva@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8582-1080>; SPIN code: 4079-4380, Scopus ID: 57473516200; ResearcherID AAZ-6062-2020
- Alina V. Vinogradova**², CSc (Eng), Lead Research Engineer; alinawin@rambler.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8935-7086>; SPIN code: 8836-8684, Scopus ID: 57204152403; ResearcherID AAM-9111-2021
- Aleksey V. Bukreev**³, CSc (Eng), Senior Research Engineer; vim@aleksey-bukreev.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0209-1167>; SPIN: 3922-8260, Scopus ID: 57192074502; ResearcherID AAE-1336-2022
- Aleksandr V. Vinogradov**⁴, DSc (Eng), Associate Professor, Professor; winaleksandr@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-8845-9718>; SPIN-code: 6652-9426, Scopus ID: 57201923234; ResearcherID AAW-4375-2021
- ^{1, 2, 3} Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 109428, Russian Federation, Moscow, 1st Institutsky Proezd Str., 5
- ⁴ Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 127434, Russia, Moscow, Timiryazevskaya Str., 49

Author Contribution

A.K. Bukreeva – conceptualization, research methodology, literature review, validation and conclusions, writing – review and editing of the manuscript;

A.V. Vinogradova – data curation and formal analysis, validation and conclusions, writing – original draft;

A.V. Bukreev – data curation and formal analysis, validation and conclusions, writing – original draft.

A.V. Vinogradov – research methodology, data curation and formal analysis, validation and conclusions, writing – review and editing of the manuscript.

Conflict of Interests

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

Received 23.10.2025; Revised 15.01.2026; Accepted 19.01.2026

ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 378:001.891

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-1-114-120>



Персонализированные стратегии развития личностно-профессиональной зрелости будущих специалистов агропромышленного комплекса

Н.Б. Авалуева^{1✉}, Д.И. Михайлова²

^{1,2} Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации;
г. Москва, Россия

¹ avalueva-nb@ranepa.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5044-7076>

² darya.mikhaylova.bel@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-8760-2383>

Аннотация. Достижению технологического лидерства в сфере агропромышленного комплекса препятствует острая нехватка высококвалифицированных специалистов. Мы полагаем, что важными аспектами подготовки востребованных специалистов в высшей школе являются личностно-профессиональное развитие обучающегося, достижение им личностно-профессиональной зрелости, однако этот аспект не находит детального отражения в современной научной литературе. Цель исследований – обоснование персонализированных стратегий развития личностно-профессиональной зрелости будущих специалистов агропромышленного комплекса. Для достижения цели использовались метод качественного контент-анализа и методы познания. Многоаспектность категорий «Зрелость», «Личностная зрелость», «Профессиональная зрелость» и их различное смысловое наполнение спроецировали необходимость введения понятия «личностно-профессиональная зрелость», содержание которого представлено с позиций сеттинг-инкрементального подхода. Учет отраслевой специфики сельскохозяйственной отрасли и результаты качественного анализа позволили выделить и обосновать 5 персонализированных стратегий развития личностно-профессиональной зрелости будущих специалистов агропромышленного комплекса: стратегия интеграции, стратегия гибкости, карьерная стратегия, стратегия сотрудничества, стратегия наставничества, которые способствуют не только развитию личностно-профессиональной зрелости будущих специалистов АПК, но и формированию кадрового потенциала сельскохозяйственной отрасли, способного эффективно отвечать на современные вызовы и обеспечить достижение технологического лидерства.

Ключевые слова: зрелость; сеттинг-инкрементальный подход; личностная зрелость; профессиональная зрелость; личностно-профессиональная зрелость; персонализированные стратегии развития личностно-профессиональной зрелости

Финансирование. Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации «12.10-2025-1. Разработка модели оценки профессиональной и личностной зрелости, включая оценку личностно-управленческих качеств и профессиональных компетенций, руководителей и специалистов по направлениям научно-технического развития».

Благодарности. Авторы выражают благодарность сотрудникам редакции журнала «Агроинженерия» и рецензентам за конструктивные замечания и ценные рекомендации.

Для цитирования: Авалуева Н.Б., Михайлова Д.И. Персонализированные стратегии развития личностно-профессиональной зрелости будущих специалистов агропромышленного комплекса // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 1. С. 114-120. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-1-114-120>

ORIGINAL ARTICLE

Personalized strategies for developing personal and professional maturity of future specialists in the agro-industrial sector

N.B. Avalueva¹✉, D.I. Mikhailova²

^{1,2} Presidential Academy of National Economy and Public Administration; Moscow, Russia

¹ avalueva-nb@ranepa.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5044-7076>

² darya.mikhaylova.bel@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-8760-2383>

Abstract. Achieving technological leadership in the agro-industrial sector is hampered by a severe shortage of highly qualified specialists. The authors argue that a critical aspect of preparing in-demand specialists in higher education is the personal and professional development of the students achieving their personal and professional maturity. However, this aspect is not fully addressed in the current scientific literature. This study aims to justify personalized strategies for developing the personal and professional maturity of future specialists in the agro-industrial sector. To achieve this goal, the authors employed qualitative content analysis and cognitive methods. The multidimensional nature of the categories “maturity,” “personal maturity,” and “professional maturity,” along with their diverse semantic meanings, necessitated the introduction of the concept of “personal and professional maturity,” the content of which is presented from the perspective of a setting-incremental approach. Taking into account the industry-specific characteristics of the agricultural sector and the results of the qualitative analysis, the study identifies and justifies five personalized strategies for developing the personal and professional maturity of future agro-industrial specialists: the integration strategy, the flexibility strategy, the career strategy, the cooperation strategy, and the mentorship strategy. These strategies contribute both to the development of personal and professional maturity of future specialists and to the development of human resources in the agro-industrial sector – those capable of effectively responding to modern challenges and achieving technological excellence.

Keywords: maturity; setting-incremental approach; personal maturity; professional maturity; personal and professional maturity; personalized strategies for the development of personal and professional maturity

Funding: The article was prepared as part of the State assignment of the Presidential Academy of National Economy and Public Administration No. 12.10-2025-1, “Development of a model for assessing professional and personal maturity, including the evaluation of personal managerial qualities and professional competencies of leaders and specialists in the areas of scientific and technological development.”

Acknowledgments: The authors also express their gratitude to the editorial staff of the Agricultural Engineering journal and the reviewers for their constructive comments and valuable recommendations.

For citation: Avalueva N.B., Mikhailova D.I. Personalized strategies for developing personal and professional maturity of future specialists in the agro-industrial sector. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(1):114-120 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-1-114-120>

Введение

Вызовы современности – такие, как «потребность в обеспечении продовольственной безопасности и продовольственной независимости России, конкурентоспособности отечественной сельскохозяйственной продукции на мировых рынках продовольствия»¹, проецируют необходимость «перехода к высокопродуктивному и экологически чистому агро- и аквахозяйству»². Правительство Российской Федерации принимает беспрецедентные меры для решения приоритетных задач научно-технологического развития сельского хозяйства.

¹ О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации: Указ Президента Российской Федерации от 28 февраля 2024 г. № 145, п. 15 д.

² Там же, п. 21 г.

Реализуемая Федеральная научно-техническая программа развития сельского хозяйства на 2017-2030 гг. (ФНТП), в которой участвуют «...29 субъектов РФ и 14 образовательных организаций высшего образования, направлена на внедрение отечественных технологий в агропромышленный комплекс. Отметим, что на базе образовательных организаций разработаны и запатентованы 2 новые отечественные технологии, разработаны 12 дополнительных профессиональных программ по перспективным направлениям селекции и семеноводства»³. Данный факт является значимым

³ АТЛАС Федеральной научно-технической программы развития сельского хозяйства на 2017-2030 годы. М.: Министерство сельского хозяйства РФ, 2022. 163 с. URL: <https://atlas-bez-riat.pdf>. С. 110 (дата обращения: 23.05.2025).

для развития системы непрерывного профессионального образования, поскольку проблема кадров в сельскохозяйственной отрасли остается нерешенной.

Стартовавший в 2025 г. Национальный проект «Технологическое обеспечение продовольственной безопасности», реализация которого подразумевает не просто замещение импортной продукции, а достижение технологического суверенитета, включает в себя 5 федеральных проектов, в том числе проект «Кадры в АПК», призванный решить вопрос обеспечения агропромышленного комплекса квалифицированными специалистами.

Для обеспечения сельскохозяйственной отрасли высококвалифицированными кадрами необходима актуализация аспектов личностно-профессионального становления, дальнейшего развития и достижения личностно-профессиональной зрелости, в первую очередь – будущих специалистов агропромышленного комплекса. Мы полагаем, что разработка и реализация персонализированных стратегий развития личностно-профессиональной зрелости будущих специалистов агропромышленного комплекса, как результата их личностно-профессионального развития в процессе получения образования (от школьника/абитуриента к студенту, специалисту, руководителю) могут рассматриваться как действенный механизм решения кадрового вопроса по привлечению эффективных работников.

Цель исследований: обоснование персонализированных стратегий развития личностно-профессиональной зрелости будущих специалистов агропромышленного комплекса.

Материалы и методы

Целенаправленная работа по определению смыслового наполнения категорий личностно-профессионального развития, личностно-профессиональной зрелости кадров агропромышленного комплекса в процессе непрерывного образования и разработки стратегии была осуществлена с помощью контент-анализа и методов познания.

Метод качественного контент-анализа [1] позволил отобрать научные исследования по вопросам личностного и профессионального развития, личностной и профессиональной зрелости, осуществить их анализ, определить методологические подходы к пониманию обозначенных категорий, выявить общие закономерности и особенности, наполнить их содержательным смыслом. Для разработки персонализированных стратегий развития личностно-профессиональной зрелости будущих специалистов агропромышленного комплекса были проанализированы

научные исследования и нормативные правовые документы по обозначенной проблематике.

Посредством универсальных методов познания (индукция и дедукция, анализ и синтез, сравнение и аналогии, абстрагирование, обобщение) разработано новое методологическое основание (сеттинг-инкрементальный подход), с позиций которого категория «Личностно-профессиональная зрелость» наполнена смысловым содержанием.

Методологической основой исследований выступает сеттинг-инкрементальный подход [2], с позиций которого рассматривается категория «Личностно-профессиональная зрелость». В основу определения и обоснования персонализированных стратегий развития личностно-профессиональной зрелости будущих специалистов агропромышленного комплекса легли основные принципы системного подхода.

Результаты и их обсуждение

Рассматривая категорию «Личностно-профессиональное развитие», мы разделяем позицию Э.Ф. Зее-ра, который отмечает, что «современные исследователи солидарны в идее о взаимообусловленности процессов профессионального и личностного развития, в результате чего в науке утверждается термин «профессионально-личностное развитие», базирующийся на принципе саморазвития, подразумевающий возможности прогрессивного преобразования личности и порождающий высшую форму человеческой жизнедеятельности – творческую самореализацию» [3].

Зрелость личности в наших исследованиях рассматривается как определенное состояние развития личности, характеризующееся ее способностью к самореализации и саморазвитию в различных аспектах жизнедеятельности, детерминированной личным, социальным и профессиональным опытом. При этом мы опираемся на позиции диспозиционно-гуманистического подхода к структуре зрелости, который позволяет рассматривать личностную зрелость как набор определенных черт личности.

Анализ научных исследований, отражающих различные аспекты личностной и профессиональной зрелости кадров агропромышленного комплекса, продемонстрировал малочисленность научных изысканий по данной тематике [4]. Возможно, это связано с доминирующим акмеологическим подходом, детально отражающим не только аспекты личностной и профессиональной зрелости человека, но и аспекты его личностного и профессионального развития (А.А. Деркач, В.Г. Зазыкин⁴, Н.В. Кузьми-

⁴Деркач А.А., Зазыкин В.Г. Акмеология: Учебное пособие. СПб.: Питер, 2003. 256 с.

на [5], Э.Ф. Зеер [6], В.В. Белов, Е.П. Привалова [7], Н.В. Провоторова [8], Л.О. Володина, С.Б. Данилов [9] и др.). Зрелость специалистов сельского хозяйства в понимании Ж.А. Новиковой – это «период взрослости, самая социально активная и продуктивная фаза жизнедеятельности, когда может осуществиться тенденция к достижению наивысшего уровня профессионального, интеллектуального и личностного развития»⁵, то есть определенная возрастная ступень. Мы же полагаем, что зрелость не зависит от возраста и на различных этапах онтогенеза человек может достигать различных уровней зрелости.

В качестве методологического основания к пониманию категории «Личностно-профессиональная зрелость» мы предлагаем сеттинг-инкрементальный подход, представляющий собой «конгломерат трех методологических оснований в развитии: системно-субъектного, аксиологического и культурологического подходов» [2]. Рассматривая зрелость как набор определенных качеств личности, которые с позиций сеттинг-инкрементального подхода представляются как динамическая ценностно-субъектная система, развивающаяся во внешней среде в процессе деятельности и влияющая на культуру этой среды, личностно-профессиональная зрелость в наших исследованиях понимается как ступень личностного и профессионального развития человека, детерминированная субъектным опытом поведения в жизненной ситуации и характеризующаяся осмысленным проявлением качеств личности (в том числе профессиональных) во взаимодействии с другими людьми/социумом/обществом.

Исходя из представленного понимания категории «Личностно-профессиональная зрелость», мы выделяем 4 ее уровня, каждый из которых связан с выполнением человеком определенных социальных ролей в процессе непрерывного образования: выпускник школы, выпускник вуза, специалист, руководитель. Однако в контексте исследований мы остановимся на обосновании персонализированных стратегий развития личностно-профессиональной зрелости будущих специалистов агропромышленного комплекса «Выпускник школы-выпускник вуза». Выделение обозначенных позиций представляется обоснованным, поскольку на стадии поступления в высшую школу (социальная роль – «Выпускник школы-абитуриент») человек осуществляет осознанный выбор

той профессиональной деятельности, которой он будет заниматься в жизни, в соответствии с которой строить свою карьеру, организовывать работу, проектировать индивидуальный и профессиональный трек своего становления, достигать личностные и профессиональные цели развития, исходя из понимания своих возможностей и внутренней мотивации. На этапе обучения в высшей школе человек адаптируется к новой социальной роли «Студент-выпускник вуза» и, соответственно, к новой социальной и профессиональной среде, принимая определенную систему правил обучения, поведения, жизнедеятельности. Соблюдение этих правил студентом приводит к накоплению опыта и пониманию принципа «нормирования» осуществляемой деятельности, причем реперными точками развития личностно-профессиональной зрелости будут социальные роли «Выпускник школы» и «выпускник вуза».

На основе обобщения имеющегося опыта подготовки будущих специалистов агропромышленного комплекса (АПК), анализа приоритетов и ключевых задач нацпроекта «Технологическое обеспечение продовольственной безопасности», Федерального проекта «Кадры в АПК» представим персонализированные стратегии развития личностно-профессиональной зрелости будущих специалистов АПК. Отметим, что стратегия представляется нам как перспективный взгляд, долгосрочный план действий, который направлен на достижение определенного карьерного результата.

В качестве одной из персонализированных стратегий развития личностно-профессиональной зрелости будущих специалистов АПК может рассматриваться реализация принципа интеграции школ и вузов в инновационные и производственные цепочки (стратегии интеграции). Важным шагом такой интеграции является расширение географии включенности обучающихся школ в проекты предпрофессиональных классов агротехнологической направленности, и эффективным механизмом такой интеграции представляется реализация проекта «Я в агро. Агроклассы»⁶, цель которого – ранняя профориентация и профессиональное самоопределение школьников. Инструментом реализации предлагаемой стратегии могут рассматриваться цифровые образовательные платформы.

Мы полагаем, что расширение инструментальной базы реализации предлагаемой стратегии интеграции (использование сервисов для геймификации, адаптивных образовательных платформ на основе

⁵ Новикова Ж.А. Этико-психологические основы профессионального развития: схемы и таблицы: Учебное пособие. Смоленск: Смоленская государственная сельскохозяйственная академия, 2020. 84 с. EDN: CNKHRK.

⁶ Агроклассы. [Электронный ресурс]. URL: <https://agroclasses.svoevagro.ru> (дата обращения: 21.06.2025).

искусственного интеллекта, технологий виртуальной (VR), дополненной (AR), смешанной (MR) реальности, 3D-визуализации и моделирования) будет способствовать более продуктивному развитию личностно-профессиональной зрелости обучающихся.

В качестве персонализированной стратегии развития личностно-профессиональной зрелости может рассматриваться карьерная стратегия. В процессе обучения в агротехклассах и вузах у обучающихся формируется понимание карьерных траекторий развития в аграрной сфере (агрономия, биотехнология, ветеринария, инженерия, экономика, финансы и др.). Возможность выстраивания карьерной траектории в АПК посредством цифровых платформ: от выбора профессии школьником до достижения определенного уровня личностно-профессиональной зрелости специалистом – предусмотрена на цифровых платформах «Я в агро. Агроклассы» и Edwica⁷ (онлайн-сервисы для построения карьерно-образовательной траектории как школьника, студента, так и молодого специалиста) посредством искусственного интеллекта и технологии Big Data.

Целью создания карьерных маршрутов являются как формирование у обучающихся четкого понимания возможных карьерных траекторий в аграрной сфере, так и накопление профессиональных знаний, умений и навыков.

Инструментами реализации карьерной стратегии являются междисциплинарность и гибкость образовательных маршрутов в области подготовки специалистов АПК.

Междисциплинарность подразумевает выход за пределы традиционных узкоспециализированных дисциплин: обучение организуется на основе интеграции знаний из различных областей (таких, как агрономия, экономика, биология, инженерия, ветеринария и информационные технологии), и наблюдается появление новых профессий в сфере АПК (аналитик данных в АПК, архитектор живых систем, инженер по 3D-печати продуктов питания, сити-фермер, агроинформатик и др.). Это позволяет студентам осознавать взаимосвязи различных аспектов производства и управления в аграрном секторе, формировать целостное представление о процессах, происходящих в АПК, развивать навыки для решения комплексных задач, корректировать карьерную траекторию.

Гибкость образовательных маршрутов создает возможность выбора направления, темп и формы

обучения в зависимости от их интересов, способностей и целей для обучающегося, что, безусловно, способствует развитию личностно-профессиональной зрелости.

Не менее важной стратегией развития личностно-профессиональной зрелости будущих специалистов АПК является взаимодействие и сотрудничество с индустриальными партнерами – крупными агрокомпаниями АПК (стратегия сотрудничества). В качестве основных форм взаимодействия образовательных организаций с индустриальными партнерами можно выделить совместные научно-исследовательские проекты, внедрение профориентационной и целевой подготовки будущих специалистов и т.д., что позволит обучающимся получать практический опыт, развивать навыки, необходимые для дальнейшей успешной карьеры в аграрном секторе, что, безусловно, представляет значимость в достижении ими личностно-профессиональной зрелости.

Сегодня сотрудничество вузов с индустриальными партнерами (при активном стимулировании государством) расширяется: «Минобрнауки России реализует ряд крупных программ и проектов, которые направлены на интеграцию вузов с индустриальными партнерами в инновационной деятельности и в подготовке кадров для высокотехнологических производств («Приоритет 2030», «Передовые инженерные школы», Федеральный проект «Кадры АПК» и др.)» [10].

Таким образом, инструментом реализации стратегии сотрудничества выступает интеграция практико-ориентированного обучения в образовательный процесс, что позволит обучающимся приобретать реальные навыки и практический опыт, а следовательно, будет способствовать развитию их личностно-профессиональной зрелости.

Еще одна стратегия – стратегия наставничества. В рамках подготовки обучающихся к будущей профессиональной деятельности в сфере АПК на этапах «Школа-вуз» наставничество может рассматриваться как передача знаний и опыта от преподавателей, научных сотрудников, представителей агробизнеса школьникам/студентам как в процессе обучения, так и в процессе их сопровождения в учебных и исследовательских проектах. Наставничество способствует передаче практического опыта, развитию soft skills, формированию профессиональных ценностей и мотивации.

В качестве инструментов реализации стратегии наставничества в АПК могут выступать: цифровые инструменты (платформы для онлайн-консультаций, электронные дневники, чек-листы и т.д.), научные исследования и проектная деятельность; практические

⁷ Карьерная траектория на основе данных. [Электронный ресурс]. URL: <https://edwica.ru/?ysclid=mciuggajkf845544727> (дата обращения: 27.05.2025).

занятия на базе предприятий АПК; стажировки и практики на предприятиях; психологическая поддержка (мотивация, помощь в преодолении трудностей на пути к профессиональному успеху и т.д.).

Выводы

Персонализированные стратегии развития личностно-профессиональной зрелости будущих специалистов АПК: стратегия интеграции, стратегия гибкости, карьерная стратегия, стратегия сотрудничества, стратегия наставничества – требуют интеграции усилий государства, образовательных организаций и бизнеса, а также постоянной актуализации образовательных практик с учетом индивидуальных особенностей обучающихся и меняющихся условий развития сельскохозяйственной отрасли.

Список источников

1. Mayring P. Qualitative Inhaltsanalyse. In: Jüttemann G. (Hrsg.) Qualitative Forschung in der Psychologie: Grundfragen, Verfahrensweisen, Anwendungsfelder. 1985:187-211. URL: <https://www.ssoar.info/ssoar/handle/document/557> (дата обращения: 27.05.2025)
2. Гаркуша Н.С., Кролевецкая Е.Н., Авалуева Н.Б. Модель качеств личности сферы управления: экспертная оценка содержания в контексте эффективности выполнения профессиональной деятельности // Science for Education Today. 2025. Т. 15, № 5. С. 139-158. <http://dx.doi.org/10.15293/2658-6762.2505.07>
3. Зеер Э.Ф., Степанова Л.Н. Акмеологическая технология прогнозирования индивидуальных профессионально-ориентированных траекторий развития личности студентов // Образование и наука. 2023. Т. 25, № 6. С. 69-99. <https://doi.org/10.17853/1994-5639-2023-6-69-99>
4. Тетеринец Т.А. Анализ и оценка человеческого капитала аграрной сферы Республики Беларусь на основе акмеологических подходов // Вестник Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова. 2025. Т. 22, № 2 (140). С. 90-100. <https://doi.org/10.21686/2413-2829-2025-2-90-100>
5. Кузьмина Н.В. Определение предмета фундаментальной акмеологии // Вестник Самарского университета. История, педагогика, филология. 2022. Т. 28, № 4. С. 60-64. <https://doi.org/10.18287/2542-0445-2022-28-4-60-64>
6. Зеер Э.Ф., Ломовцева Н.В., Третьякова В.С. Готовность преподавателей вуза к онлайн-образованию: цифровая компетентность, опыт исследования // Педагогическое образование в России. 2020. № 3. С. 26-39. <https://doi.org/10.26170/po20-03-03>
7. Белов В.В., Привалова Е.П. Акмеологический подход к разработке описательной модели аутопсихологической компетентности топ-менеджеров коммерческих организаций // Вестник Ленинградского государственного университета имени А.С. Пушкина. 2020. № 4. С. 216-234. https://doi.org/10.35231/18186653_2020_4_216
8. Провоторова Н.В. Методологические подходы как определяющий конструкт формирования концепции профессиональной готовности будущих специалистов сферы государственного управления к инновационной деятельности // Вестник Костромского государственного университета. Серия «Педагогика. Психология. Социокинетика». 2022. Т. 28, № 1. С. 198-204. EDN: RAFBNS

Поскольку ключевым этапом становления школьников/студентов востребованными специалистами, личностно и профессионально зрелыми, способными не только адаптироваться к быстро меняющимся условиям современности, но и быть драйверами технологических изменений, обеспечивать продовольственную и технологическую безопасность страны, является начальный этап непрерывного образования «Школа-вуз», предлагаемые стратегии должны способствовать не только развитию личностно-профессиональной зрелости будущих специалистов АПК, но и формированию кадрового потенциала сельскохозяйственной отрасли, способного эффективно отвечать на современные вызовы и обеспечить достижение технологического лидерства.

References

1. Mayring P. Qualitative Inhaltsanalyse. In: Jüttemann G. (Hrsg.) Qualitative Forschung in der Psychologie: Grundfragen, Verfahrensweisen, Anwendungsfelder. 1985. S. 187-211. URL: <https://www.ssoar.info/ssoar/handle/document/557> (Access date 27.05.2025).
2. Garkusha N.S., Krolevetskaya E.N., Avalueva N.B. A model of personality traits in the field of management: an expert assessment of the content with the main focus on the effectiveness of job performance. *Science for Education Today*. 2025;15(5):139-158. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.15293/2658-6762.2505.07>
3. Zeer E.F., Stepanova L.N. Acmeological technology of forecasting individual professional-oriented trajectories of students' personality development. *The Education and Science Journal*. 2023;25(6):69-98. (In Russ.) <https://doi.org/10.17853/1994-5639-2023-6-69-99>
4. Tsetsiarynets T.A. Analysis and assessment of human capital in agrarian field of the Republic of Belarus based on acmeological approaches. *Vestnik of the Plekhanov Russian University of Economics*. 2025;2:90-100. (In Russ.) <https://doi.org/10.21686/2413-2829-2025-2-90-100>
5. Kuzmina N.V. Definition of the subject of fundamental acmeology. *Vestnik of Samara University. History, Pedagogics, Philology*. 2022;28(4):60-64. (In Russ.) <http://doi.org/10.18287/2542-0445-2022-28-4-60-64>
6. Zeer E.Ph., Lomovtceva N.V., Tretyakova V.S. University teachers' readiness for online education: Digital competence, research experience. *Pedagogical Education in Russia*. 2020;3:26-39. (In Rus.) <https://doi.org/10.26170/po20-03-03>
7. Belov V.V., Privalova E.P. Acmeological approach to development of descriptive model of autopsychological competence of commercial organizations' top managers. *Pushkin Leningrad State University Journal*. 2020;4:216-234. (In Russ.) https://doi.org/10.35231/18186653_2020_4_216
8. Provotorova N.V. Methodological approaches as a defining construct of the formation of the concept of professional readiness of future specialists in the field of public administration for innovative activity. *Vestnik of Kostroma State University. Series: Pedagogy. Psychology. Sociokinetics*. 2022;28(1):198-204. (In Russ.)
9. Volodina L.O., Danilov S.B. Individual educational route for the development of digital competencies of a teacher: methodology, role and specifics of building. *RUDN Journal*

9. Володина Л.О., Данилов С.Б. Индивидуальный образовательный маршрут в развитии цифровых компетенций педагога: методология, роли и особенности построения // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия «Информатизация образования». 2025. Т. 22, № 3. С. 361-370. <https://doi.org/10.22363/2312-8631-2025-22-3-361-370>

10. Штыкно Д.А., Петров А.М. Взаимодействие вузов с индустриальными партнерами // Научные труды Вольного экономического общества России. 2023. Т. 243, № 5. С. 85-97. EDN: MFLDYK

Информация об авторах

¹ **Авалуева Наталия Борисовна**, канд. пед. наук, ведущий научный сотрудник Дирекции приоритетных образовательных инициатив РАНХиГС; avalueva-nb@ranepa.ru[✉]; SPIN-код: 5195-6112; <https://orcid.org/0000-0002-5044-7076>

² **Михайлова Дарья Ивановна**, канд. пед. наук, ведущий научный сотрудник Дирекции приоритетных образовательных инициатив РАНХиГС; darya.mikhaylova.bel@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-8760-2383>; SPIN-код: 2531-5521

^{1,2} Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации; 119571, г. Москва, пр-кт. Вернадского, д. 82, стр. 1

Вклад авторов

Н.Б. Авалуева – концептуализация, методология; Д.И. Михайлова – создание черновика рукописи и формирование выводов исследований.

Конфликт интересов

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

Статья поступила 12.07.2025, после рецензирования и доработки 12.01.2026; принята к публикации 14.01.2026

of Informatization in Education. 2025;22(3):361-370. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8631-2025-22-3-361-370>

10. Shtykhno D.A., Petrov A.M. Interaction between higher educational institutions and their partners. *Scientific works of the Free economic society of Russia*. 2023;243(5):85-97. (In Russ.)

Author Information

N.B. Avalueva¹, CSc (Ed), Lead Researcher, Directorate of Priority Educational Initiatives, avalueva-nb@ranepa.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5044-7076>

D.I. Mikhailova², CSc (Ed), Lead Researcher, Directorate of Priority Educational Initiatives, darya.mikhaylova.bel@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-8760-2383>

^{1,2} Presidential Academy of National Economy and Public Administration; 82, Bld 1, Vernadskogo Ave., Troparevo-Nikulino, Moscow, 119571, Russian Federation

Author Contribution

N.B. Avalueva – conceptualization; research methodology. D.I. Mikhaylova – writing – original draft; conclusions.

Conflict of interests

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

Received 12.07.2025; Revised 12.01.2026; Accepted 14.01.2026