ISSN 2658-4123
eISSN 2658-6525

ИНЖЕНЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

ENGINEERING TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

2025 Том Vol. 35 № No. 3

DOI: 10.15507/2658-4123

https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202503 ISSN 2658-4123, eISSN 2658-6525

Том 35, № 3. 2025

Научный журнал
Основан в январе 1990 г.
Периодичность издания – 4 раза в год

16+

Vol. 35, no. 3. 2025

Scientific journal
Founded in January 1990
Periodicity: Quarterly

ИНЖЕНЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

ENGINEERING TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

https://doi.org/10.15507/2658-4123

Учредитель и издатель – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева»

Главный редактор П. В. Сенин

Предыдущее название (до 2019 года): **Вестник Мордовского университета**

Founder and Publisher – Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "National Research Ogarev Mordovia State University"

Editor-in-Chef P. V. Senin

The previous name until beginning of 2019: **Mordovia University Bulletin**

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (Перечень ВАК)

Индексируется и архивируется в Web of Science Core Collection (ESCI), Russian Science Citation Index (RSCI), Российском индексе научного цитирования (РИНЦ).

Является членом Directory of Open Access Journals (DOAJ), Open Access Scholarly Publishers Association (OASPA), Committee on Publication Ethics (COPE), Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ) и CrossRef

Зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзоре), реестровая запись ПИ № ФС 77-74640 от 24.12.2018 г.

Подписной индекс – **70539**

Адрес учредителя, издателя и редакции:
430005, Российская Федерация,
Республика Мордовия,
г. Саранск, ул. Большевистская, д. 68/1
Тел./факс: +7 (8342) 48-14-24

Founder, Publisher and Editorial House address:
68/1 Bolshevistskaya St., Saransk 430005,
Republic of Mordovia,
Russian Federation
Tel/Fax: +7 8342 481424

© ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарева», 2025

Инженерные технологии и системы

рецензируемый научный журнал открытого доступа

Цель научного журнала открытого доступа «Инженерные технологии и системы» – знакомство читателей с результатами оригинальных научных исследований в области агропромышленного комплекса и машиностроения России и зарубежных стран. Миссия журнала – создание международной площадки для научной дискуссии исследователей, обмена опытом и публикации актуальных достижений в сфере инженерных систем и технологий.

Журнал адресован исследователям и специалистам, работающим в машиностроении и сельском хозяйстве, преподавателям, аспирантам и студентам высших учебных заведений, а также широкому кругу читателей, интересующихся перспективными направлениями отечественной и зарубежной инженерии.

Редакция журнала осуществляет научное рецензирование (двустороннее слепое) всех поступающих статей. Рукопись статьи направляется на рецензирование для оценки ее научного содержания нескольким ведущим специалистам соответствующего профиля, имеющим научную специализацию, наиболее близкую к тематике статьи.

Редакция журнала реализует принцип нулевой толерантности к плагиату. Мониторинг некорректного цитирования осуществляется с помощью систем «Антиплагиат» и «iThenticate».

Распространение – Российская Федерация, зарубежные страны.

Журнал предоставляет открытый доступ к полным текстам публикаций, исходя из следующего принципа: открытый доступ к результатам исследований способствует увеличению глобального обмена знаниями.

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по научным специальностям и соответствующим им отраслям науки:

1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики (технические науки)
1.3.6. Оптика (технические науки)
1.3.13. Электрофизика, электрофизические установки (технические науки)
2.5.3. Трение и износ в машинах (технические науки)
4.1.4. Садоводство, овощеводство, виноградарство и лекарственные культуры (технические науки)
4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки)
4.3.2. Электротехнологии, электрооборудование и энергоснабжение агропромышленного комплекса (технические науки)

Журнал индексируется и архивируется в базах данных:
Web of Science Core Collection (ESCI)
Russian Science Citation Index (RSCI)
Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)

Журнал является членом Open Access Scholarly Publishers Association (OASPA), Directory of Open Access Journals (DOAJ), Committee on Publication Ethics (COPE), Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ), CrossRef

Материалы журнала доступны по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная

Engineering Technologies and Systems

A peer-reviewed open access academic journal

The purpose of the open access academic journal Engineering Technologies and Systems is to introduce the readers to the results of original scientific research in the field of agroindustrial complex and mechanical engineering of Russia and foreign countries. The mission of the journal is to create an international platform for scholarly disputes of researchers, exchange of experience and publication of the articles on current achievements in the field of engineering systems and technologies.

The journal is addressed to researchers and specialists working in mechanical engineering and agriculture, teachers, postgraduates and students of higher educational institutions, and to a wide range of readers interested in advanced research directions of domestic and foreign engineering.

The Editorial Board reviews (double-blind review) all incoming papers. The manuscript of the article is sent for review to several leading specialists of the corresponding profile, who have scientific specialization closest to the subject of the article, to evaluate the scientific content.

The Editorial Board follows the principle of zero tolerance to plagiarism. The incorrect citations shall be monitored with the help of Antiplagiat and iThenticate systems.

The journal is distributed in Russian Federation and other countries of the world.

The journal offers direct open access to full-text issues based on the following principle: open access to research results contributes to the global knowledge sharing.

The journal is included in the List of the leading peer-reviewed scientific journals and publications, where basic scientific results of dissertations for the degrees of Doctor and Candidate of Sciences in scientific specialties and their respective branches of science should be published (Higher Attestation Commission under the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation):

Instruments and Methods of Experimental Physics
Optics
Electrophysics, Electrophysical Installations
Friction and Wear in Machines
Gardening, Olericulture, Viticulture and Medicinal Plants
Technologies, Machinery and Equipment for Agroindustrial Complex
Electrotechnologies, Electrical Equipment and Power Supply of Agroindustrial Complex

The journal is indexed and archived by databases:
Web of Science Core Collection (ESCI)
Russian Science Citation Index (RSCI)
Russian Index of Science Citation

The journal is a member of Open Access Scholarly Publishers Association (OASPA), Directory of Open Access Journals (DOAJ), Committee on Publication Ethics (COPE), Association of Scientific Editors and Publishers (ASEP), CrossRef

All the materials of the Engineering Technologies and Systems journal are available under Creative Commons “Attribution” 4.0 license

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Сенин Петр Васильевич – *главный редактор*, доктор технических наук, профессор, руководитель Высшей школы развития научно-образовательного потенциала Национального исследовательского Мордовского государственного университета, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3400-7780, vice-rector-innov@adm.mrsu.ru (Саранск, Российская Федерация)

Левцев Алексей Павлович – *заместитель главного редактора*, технических наук, профессор, заведующий кафедрой теплоэнергетических систем Национального исследовательского Мордовского государственного университета, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2429-6777, levtzevap@mail.ru (Саранск, Российская Федерация)

Чаткин Михаил Николаевич – *заместитель главного редактора*, доктор технических наук, профессор кафедры мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А. И. Лещанкина Национального исследовательского Мордовского государственного университета, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3758-7066, chatkinm@yandex.ru (Саранск, Российская Федерация)

Гордина Екатерина Павловна – *ответственный секретарь* редакции научных журналов Национального исследовательского Мордовского государственного университета, vestnik_mrsu@mail.ru (Саранск, Российская Федерация)

Аллахвердиев Сурхай Рагим оглы – доктор биологических наук, академик Российской Академии Естествознания, профессор кафедры экологии и природопользования Московского педагогического государственного университета (Москва, Российская Федерация); профессор кафедры лесной индустрии Бартынского государственного университета (Бартын, Турция)

Астахов Михаил Владимирович – доктор технических наук, профессор кафедры колесных машин и прикладной механики Калужского филиала Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8675-1611 (Калуга, Российская Федерация)

Булгаков Алексей Григорьевич – доктор технических наук, профессор кафедры промышленного и гражданского строительства Юго-Западного государственного университета (Курск, Российская Федерация); профессор строительного факультета Дрезденского технического университета, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4261-9840 (Дрезден, Германия)

Гербер Юрий Борисович – доктор технических наук, профессор кафедры технологии и оборудования производства и переработки продукции животноводства Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3224-6833 (Симферополь, Российская Федерация)

Гусаров Владимир Владимирович – кандидат технических наук, доцент, декан факультета механизации сельского хозяйства Белорусской государственной орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственной академии, ORCID: https://orcid.org/0009-0009-7819-6019 (Горки, Республика Беларусь)

Чжень Дайфен – Ph.D., профессор, декан Школы энергетики Цзянсуского университета науки и технологии, директор Международной объединенной лаборатории по экологической энергетике судов и контролю выбросов Цзянсу, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4110-2199 (Чжэньцзян, Китай)

Димитров Валерий Петрович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой управления качеством Донского государственного технического университета, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1439-1674 (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Жачкин Сергей Юрьевич – доктор технических наук, профессор кафедры эксплуатации транспортных и технологических машин Воронежского государственного аграрного университета имени императора Петра I, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1844-5011 (Воронеж, Российская Федерация)

Железникова Ольга Евгеньевна – кандидат технических наук, доцент, директор Института электроники и светотехники Национального исследовательского Мордовского государственного университета (Саранск, Российская Федерация)

Игумнов Леонид Александрович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой ТКЭМ ИИТММ Национального исследовательского Нижегородского государственного университета имени Н. И. Лобачевского, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3035-0119 (Нижний Новгород, Российская Федерация)

Истомина Наталья Леонидовна – доктор физико-математических наук, начальник отдела физических наук Российской академии наук, заместитель академика-секретаря по научноорганизационной работе ОФН РАН; профессор кафедры управления инновациями Московского авиационного института (национального исследовательского университета); главный редактор научно-технического журнала «Фотоника», ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6008-1226 (Москва, Российская Федерация)

Кечемайкин Владимир Николаевич – кандидат экономических наук, доцент, директор Рузаевского института машиностроения Национального исследовательского Мордовского государственного университета (Саранск, Российская Федерация)

Котин Александр Владимирович – доктор технических наук, профессор кафедры механизации переработки сельскохозяйственной продукции Национального исследовательского Мордовского государственного университета, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8235-0052 (Саранск, Российская Федерация)

Кусмарцев Федор Васильевич – Ph.D., декан физического факультета Университета Лафборо (Лафборо, Великобритания); профессор Колледжа искусств и наук Университета Халифы (Абу-Даби, ОАЭ)

Кухарев Олег Николаевич – доктор технических наук, профессор, ректор Пензенского государственного аграрного университета, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3519-4066 (Пенза, Российская Федерация)

Лобачевский Яков Петрович – доктор технических наук, профессор, академик РАН, первый заместитель директора Федерального научного агроинженерного центра ВИМ; академик-секретарь Отделения сельскохозяйственных наук РАН, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7863-2962 (Москва, Российская Федерация)

Микаева Светлана Анатольевна – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электроники МИРЭА – Российского технологического университета, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6992-455X (Москва, Российская Федерация)

Несмиян Андрей Юрьевич – доктор технических наук, профессор кафедры технологий и средств механизации агропромышленного комплекса, заместитель директора по научной работе и инновациям Азово-Черноморского инженерного института Донского государственного аграрного университета, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3473-8081 (Зерноград, Российская Федерация)

Остриков Валерий Васильевич – доктор технических наук, профессор, директор Всероссийского научно-исследовательского института использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2927-768X (Тамбов, Российская Федерация)

Плотников Сергей Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения Вятского государственного университета, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8887-4591 (Киров, Российская Федерация)

Прытков Юрий Николаевич – доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры зоотехники имени профессора С. А. Лапшина Национального исследовательского Мордовского государственного университета, ORCID: https://orcid.org/0009-0006-4344-4383 (Саранск, Российская Федерация)

Рудик Феликс Яковлевич – доктор технических наук, профессор кафедры технологий продуктов питания Саратовского государственного университета генетики, биотехнологии и инженерии имени Н. И. Вавилова, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8444-0115 (Саратов, Российская Федерация)

Рябочкина Полина Анатольевна – доктор физико-математических наук, профессор, научный руководитель лаборатории оптической спектроскопии лазерных материалов Национального исследовательского Мордовского государственного университета, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8503-8486 (Саранск, Российская Федерация)

Салем Абдель-Бадех Мохамед – доктор наук в области компьютерных технологий, заслуженный профессор, руководитель исследовательских лабораторий в области искусственного интеллекта и знаний, профессор факультета компьютерных и информационных наук университета Айн Шамс, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0268-6539 (Каир, Египет)

Симдянкин Аркадий Анатольевич – доктор технических наук, профессор кафедры биомеханики и естественно научных дисциплин Российского университета спорта «ГЦОЛИФК», ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9761-6183 (Москва, Российская Федерация)

Скрябин Владимир Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры технологий и оборудования машиностроения Пензенского государственного университета, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7156-9198 (Пенза, Российская Федерация)

Тарасов Евгений Михайлович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматики, телемеханики и связи на железнодорожном транспорте Самарского государственного университета путей сообщения, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2717-7343 (Самара, Российская Федерация)

Федулова Лилия Вячеславовна – доктор технических наук, профессор РАН, заведующий экспериментальной клиникой лаборатории биологически активных веществ животного происхождения Федерального научного центра пищевых систем имени В. М. Горбатова РАН, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3573-930X (Москва, Российская Федерация)

Шишелова Тамара Ильинична – доктор технических наук, профессор кафедры физики Иркутского национального исследовательского технического университета, ORCID: https://orcid.org/0009-0008-7533-2401 (Иркутск, Российская Федерация)

EDITORIAL BOARD

Petr V. Senin – *Editor-in-Chief*, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Higher School for Development of Scientific and Educational Potential of the National Research Mordovia State University, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3400-7780, vice-rector-innov@adm.mrsu.ru (Saransk, Russian Federation)

Alexey P. Levtsev – *Deputy Editor-in-Chief*, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Heat and Power Systems, National Research Mordovia State University, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2429-6777, levtzevap@mail.ru (Saransk, Russian Federation)

Mikhail N. Chatkin – *Deputy Editor-in-Chief*, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Mobile Energy Facilities and Agricultural Machines named after Professor A.I. Leshchankin, National Research Mordovia State University, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3758-7066, chatkinm@yandex.ru (Saransk, Russian Federation)

Ekaterina P. Gordina – *Executive Editor*, National Research Mordovia State University, vestnik_mrsu@mail.ru (Saransk, Russian Federation)

Surkhay Allahverdiyev – Dr.Sci. (Biol.), Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, Professor of the Chair of Ecology and Nature Management, Moscow Pedagogical State University (Moscow, Russian Federation); Head of the Forest Industry Chair, Bartin University (Bartin, Turkey)

Mikhail V. Astakhov – Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Wheeled Machines and Applied Mechanics, Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8675-1611 (Kaluga, Russian Federation)

Alexey G. Bulgakov – Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Industrial and Civil Engineering, Southwest State University (Kursk, Russian Federation); Professor of the Faculty of Civil Engineering, Dresden University of Technology, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4261-9840 (Dresden, Germany)

Daifen Chen – Ph.D., Professor, Dean of the School of Energy and Power, Jiangsu University of Science and Technology; Director of the International Joint Laboratory of Ship Green Power and Emission Control of Jiangsu, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4110-2199 (Zhenjiang, China)

Valeriy P. Dimitrov – Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Quality Management, Don State Technical University, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1439-1674 (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Liliya V. Fedulova – Dr.Sci. (Eng.), Professor of RAS, Head of the Experimental Clinic of the Laboratory of Bioactive Substances of Animal Origin, V. M. Gorbatov Federal Research Center of Food Systems, Russian Academy of Sciences, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3573-930X (Moscow, Russian Federation)

Yuriy B. Gerber – Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Technology and Equipment for Producing and Processing Livestock Products, V. I. Vernadsky Crimean Federal University, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3224-6833 (Simferopol, Russian Federation)

Vladimir V. Gusarov – Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, Dean of the Agricultural Mechanization Faculty, Belarusian State Agricultural Academy, ORCID: https://orcid.org/0009-0009-7819-6019 (Gorki, Republic of Belarus)

Leonid A. Igumnov – Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor, Principal Researcher of Research Institute of Mechanics, Lobachevsky Nizhniy Novgorod State University, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3035-0119 (Nizhniy Novgorod, Russian Federation)

Natalia L. Istomina – Dr.Sci. (Phys.-Math.), Head of Physical Sciences Department, Russian Academy of Sciences, Deputy of Academic Secretary for Scientific and Organizational Work; Professor of the Innovation Management Chair, Moscow Aviation Institute (National Research University); Editor-in-Chief, Photonics Russia, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6008-1226 (Moscow, Russian Federation)

Vladimir N. Kechemaykin – Cand.Sci. (Econ.), Associate Professor, Director of the Ruzaevka Institute of Mechanical Engineering, National Research Mordovia State University (Saransk, Russian Federation)

Alexander V. Kotin – Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Mechanization of Agricultural Production Processing, National Research Mordovia State University, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8235-0052 (Saransk, Russian Federation)

Oleg N. Kukharev – Dr.Sci. (Eng.), Professor, Rector of Penza State Agrarian University, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3519-4066 (Penza, Russian Federation)

Fedor V. Kusmartsev – Ph.D., Head of the Physics Department, Loughborough University (Loughborough, Great Britain); Professor of the College of Arts and Sciences, Khalifa University (Abu Dhabi, UAE)

Yakov P. Lobachevskiy – Dr.Sci. (Eng.), Professor, First Deputy Director, Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Academician-Secretary of the Department of Agricultural Sciences of RAS, Academician of RAS, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7863-2962 (Moscow, Russian Federation)

Svetlana A. Mikayeva – Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Chair of Electronics, MIREA – Russian Technological University, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6992-455X (Moscow, Russian Federation)

Andrey Yu. Nesmiyan – Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Deputy Director for Research and Innovation, Azov-Black Sea Engineering Institute of Don State Agrarian University, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5556-1767 (Zernograd, Russian Federation)

Valeriy V. Ostrikov – Dr.Sci. (Eng.), Professor, Director of the All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2927-768X (Tambov, Russian Federation)

Sergey A. Plotnikov – Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Mechanical Engineering Technology, Vyatka State University, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8887-4591 (Kirov, Russian Federation)

Yuriy N. Prytkov – Dr.Sci. (Agric.), Professor of the Prof. S. A. Lapshin Chair of Zootechnics, National Research Mordovia State University (Saransk, Russian Federation)

Feliks Ya. Rudik – Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Technologies of Food Products, Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N. I. Vavilov, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8444-0115 (Saratov, Russian Federation)

Polina A. Ryabochkina – Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor, Chief Scientific Officer of the Laboratory of Optical Spectroscopy of Laser Materials, National Research Mordovia State University, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8503-8486 (Saransk, Russian Federation)

Abdel-Badeeh M. Salem – Dr.Sci. (CS), Professor Emeritus, Head of Artificial Intelligence and Knowledge Engineering Research Labs, Professor of the Faculty of Computer and Information Sciences, Ain Shams University, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0268-6539 (Cairo, Egypt)

Tamara I. Shishelova – Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Physics, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russian Federation)

Arkadii A. Simdiankin – Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Technical Biomechanics and Natural Science Subjects, Russian University of Sport (GTSOLIFK), ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9761-6183 (Moscow, Russian Federation)

Vladimir A. Skryabin – Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Technology and Equipment in Mechanical Engineering, Penza State University, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7156-9198 (Penza, Russian Federation)

Evgeniy M. Tarasov – Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Automatics, Telemechanics and Communication on Railway Transport, Samara State Transport University, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2717-7343 (Samara, Russian Federation)

Sergey Yu. Zhachkin – Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Operation of Transport and Technological Machines, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter I, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1844-5011 (Voronezh, Russian Federation)

Olga Ye. Zheleznikova – Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, Director of the Institute of Electronics and Light Engineering, National Research Mordovia State University (Saransk, Russian Federation)

https://vestnik.mrsu.ru
https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202503
ISSN 2658-4123
eISSN 2658-6525

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Кравченко В. А., Кравченко Л. В., Журба В. В. Тягово-энергетические показатели движителей колесных мобильных энергетических средств сельскохозяйственного назначения 370

Брагинец С. В., Пахомов В. И., Бахчевников О. Н., Алферов А. С., Деев К. А. Рациональные значения параметров процесса влажного гранулирования корма для рыб в корзинном грануляторе 393

Блохин Ю. И., Черяев А. С., Блохина С. Ю. Разработка и апробация программно-аппаратного комплекса с веб-интерфейсом отображения данных мониторинга локальных метеоусловий 414

Пронин С. П., Зрюмова А. Г., Пилецкий А. А., Беляев В. И. Интеллектуальная оценка урожайности пшеницы по вариабельному потенциалу семян 443

Брюханов А. Ю., Васильев Э. В., Базыкин В. И., Шалавина Е. В. Исследования выделения парниковых газов при переработке навоза молодняка крупного рогатого скота 465

Труфляк Е. В., Рагозин Л. В. Эффективность дифференцированного внесения азотных удобрений с использованием модели искусственного интеллекта 489

Старцев С. В., Павлов А. В., Нестеров Е. С. Эксплуатационно-технологические показатели агрегатов с плугами ПНЛ-8-40 и ПБС-8М для обработки почвы в засушливом земледелии 513

ТРЕНИЕ И ИЗНОС В МАШИНАХ

Лимаренко Н. В., Савенков Д. Н., Гладких Д. И., Щербаков А. А. Закон распределения коррозии узлов сельскохозяйственной техники при воздействии солевого тумана 529

Фадеев И. В., Шемякин А. В., Успенский И. А., Чаткин М. Н., Юхин И. А. Снижение коррозионной активности противообледенительной жидкости для обработки воздушных судов перед полетом 554

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

Элмнифи М., Дуюн Т. А. Исследование эксплуатационных характеристик фотоэлектрического воздухосборника с ребрами из пеноалюминия (на англ. яз.) 573

Информация для авторов и читателей 589

https://vestnik.mrsu.ru
https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202503
ISSN 2658-4123
eISSN 2658-6525

CONTENTS

TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT

Kravchenko V. A., Kravchenko L. V., Jurba V. V. Traction and Energy Indicators of Propellers of Wheeled Mobile Energy Vehicles for Agricultural Purposes 370
Braginets S. V., Pakhomov V. I., Bakhchevnikov O. N., Alferov A. S., Deev K. A. Rational Values of Fish Feed Wet Pelleting Process in the Basket Pelleter 393
Blokhin Yu. I., Cheryaev A. S., Blokhina S. Yu. Developing and Testing of a Hardware and Software Complex with a Web Interface for Displaying Local Meteorological Monitoring Data 414
Pronin S. P., Zryumova A. G., Piletsky A. A., Belyaev V. I. Intelligent Assessment of Wheat Yield through the Variable Potential of Seeds 443
Briukhanov A. Yu., Vasilev E. V., Bazykin V. I., Shalavina E. V. Study of Greenhouse Gas Emission from Young Cattle Manure Processing 465
Truflyak E. V., Ragozin L. V. Efficiency of Variable Rate Application of Nitrogen Fertilizers Using Artificial Intelligence Model 489
Startsev S. V., Pavlov A. V., Nesterov E. S. Operational and Technological Indicators of the Aggregates with the Plows PNL-8-40 and PBS-8M for Processing Soils in Arid Regions 513

FRICTION AND WEAR IN MACHINES

Limarenko N. V., Savenkov D. N., Gladkih D. I., Shcherbakov A. A. Distribution Law of Corrosion of Agricultural Machinery Components under the Influence of Salt Spray 529
Fadeev I. V., Shemyakin A. V., Uspensky I. A., Chatkin M. N., Yukhin I. A. Reducing Corrosive Activity of Deicing Liquid for Pre-Flight Treatment of Aircraft 554

ELECTRICAL TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT

Elmnifi M., Duyun T. A. Performance Studies of Photovoltaic Air Collector with Aluminum Foam Fins 573

Information for Authors and Readers of the Journal 589

https://vestnik.mrsu.ru ISSN 2658-4123, eISSN 2658-6525

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ / TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT

https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202503.370-392
EDN: https://elibrary.ru/nqoxup
УДК 631.372

Оригинальная статья / Original article

Тягово-энергетические показатели движителей колесных мобильных энергетических средств сельскохозяйственного назначения

В. А. Кравченко, Л. В. Кравченко✉, В. В. Журба
Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
✉ *lyudmila.vl.kravchenko@yandex.ru*

Аннотация

Введение. Ключевой задачей, стоящей перед работниками сельского хозяйства в Российской Федерации, является обеспечение продовольственной безопасности страны на основе эффективного конкурентноспособного агропромышленного производства и успешное интегрирование в мировой рынок сельскохозяйственной продукции. В решении этой задачи особое место занимает техническое перевооружение агропромышленного комплекса путем оснащения его новой и модернизированной колесной мобильной сельскохозяйственной техникой с установленными движителями на пневматических шинах, что дает возможность получения большей мобильности и производительности.

Цель исследования. Установить зависимости энергетических показателей шины в общем случае качения колеса мобильного сельскохозяйственного средства.

Материалы и методы. При исследовании энергетических показателей ведущих пневматических колес мобильной техники нами использован теоретико-экспериментальный метод. В качестве объектов испытаний в полевых условиях на «шинном тестере» использовались серийно выпускаемые шины моделей Ф-81, ФД-12 и Ф-85, применяемые для комплектования ходовых систем тракторов пятого класса тяги.

Результаты исследования. В результате теоретических и экспериментальных исследований определили зависимости тягового коэффициента ведущих колес на пневматических шинах при работе в общем случае движения.

Обсуждение и заключение. В ходе аналитических и экспериментальных исследований, при общем виде движения ведущих пневматических колес мобильных энергетических средств пятого класса тяги, было установлено следующее: снижение тяговых свойств пневматических колес при их движении с уводом – даже при незначительных углах увода шины (1,5…2,5°) буксование увеличивается до 25 %; сопротивление самопередвижению ведущего пневматического колеса с увеличением угла бокового увода при качении с номинальной загрузкой больше как по величине, так и по темпу его роста, чем ведомого; потери мощности на буксование при качении колеса с шиной 30,5R-32 в ведущем режиме составляют 37…46 %, а на сопротивление самопередвижению – 54…63 % от всех затрат энергии. Результаты исследований необходимо учитывать при совершенствовании шин ходовых систем мобильных сельскохозяйственных агрегатов.

© Кравченко В. А., Кравченко Л. В., Журба В. В., 2025

Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Ключевые слова: тягово-энергетические показатели, пневматическое колесо, режимы нагружения колеса, коэффициент полезного действия колеса, увод колеса, буксование колеса, сопротивление качению колеса

Благодарности: авторы выражают признательность анонимным рецензентам, объективные замечания которых способствовали повышению качества статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Кравченко В.А., Кравченко Л.В., Журба В.В. Тягово-энергетические показатели движителей колесных мобильных энергетических средств сельскохозяйственного назначения. *Инженерные технологии и системы.* 2025;35(3):370–392. https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202503.370-392

Traction and Energy Indicators of Propellers of Wheeled Mobile Energy Vehicles for Agricultural Purposes

V. A. Kravchenko, L. V. Kravchenko✉, V. V. Jurba
Don State Technical University,
Rostov-on-Don, *Russian Federation*
✉ *lyudmila.vl.kravchenko@yandex.ru*

Abstract

Introduction. The key task facing the agricultural workers of the Russian Federation is to ensure the national food security based on effective competitive agro-industrial production and successful integration into the global agricultural market. In solving this problem, a special place is given to the technical re-equipment of the agro-industrial complex through equipping it with new and modernized wheeled mobile agricultural machinery with propellers set on pneumatic tires providing greater mobility and productivity.
Aim of the Study. The study is aimed at finding the dependence of the tire energy indicators during the general case of rolling the wheel of a mobile agricultural vehicle.
Materials and Methods. When studying the energy parameters of the leading pneumatic wheels of mobile equipment, there was used a theoretical and experimental method. As objects for field tests on "tire tester", there were used series-produced tire models F-81, FD-12 and F-85 applied to equip the running systems of the tractors of the traction class 5.
Results. As a result of theoretical and experimental studies, there was found the dependence of the traction coefficient of the driving wheels on pneumatic tires during the general case of motion.
Discussion and Conclusion. In the course of analytical and experimental studies during the general case of motion of the driving pneumatic wheels of mobile energy vehicles of the fifth traction class, there was found that: a decrease in the traction properties of pneumatic wheels when they move with directional troubles, even at minor slip angles (1.5...2.5°), slipping increases to 25%; resistance to self-movement of the driving pneumatic wheel with increasing the side-slip angle when rolling with a nominal load is greater both in magnitude and in the rate of its growth than of a the driven wheel; power losses for slipping when rolling a wheel with the tire 30.5R-32 in driving are to 37...46%, and for resistance to self–movement – 54 ...63% of all energy costs.

Keywords: traction and energy indicators, pneumatic wheel, wheel loading modes, the efficiency of the wheel, wheel withdrawal, wheel slipping, resistance to the wheel rolling

Acknowledgments: The authors are grateful to the anonymous reviewers whose objective comments contributed to the quality of the article.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

For citation: Kravchenko V.A., Kravchenko L.V., Jurba V.V. Traction and Energy Indicators of Propellers of Wheeled Mobile Energy Vehicles for Agricultural Purposes. *Engineering Technologies and Systems.* 2025;35(3):370–392. https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202503.370-392

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение продовольственной безопасности Российской Федерации является важной задачей, стоящей перед работниками сельского хозяйства. Решение данной задачи возможно с помощью эффективного конкурентноспособного агропромышленного производства и успешного интегрирования в мировой рынок сельскохозяйственной продукции. Для этого необходимо техническое перевооружение агропромышленного комплекса путем оснащения его современной и модернизированной высокоэффективной мобильной сельскохозяйственной техникой [1–3].

Важным направлением реализации поставленной задачи представляется повышение эффективности эксплуатации мобильной сельскохозяйственной техники как одной из проблем агропромышленного комплекса. Однако анализ реальной ситуации показал, что решение этой проблемы встречает ряд трудностей, связанных со многими факторами, в том числе с неустановившимися процессами функционирования машинно-тракторных агрегатов (МТА) [4; 5]. Наличие указанных трудностей, несмотря на значительные успехи отечественных и зарубежных исследователей и научных коллективов в этом направлении, не позволили до настоящего времени найти оптимальное решение [4; 6].

Наибольшее распространение получили мобильные энергетические средства (МЭС) на колесных движителях. Среди всех разновидностей МЭС в мире они составляют более 85 % [1; 2; 4]. Поэтому весьма актуальным является решение проблемы повышения тягово-энергетических показателей функционирования колесной мобильной сельскохозяйственной техники.

Известно, что тяговый КПД МЭС зависит главным образом от КПД движителей, так как в них происходят главные непроизводительные потери энергии при перемещении МТА, в связи с чем технико-экономические показатели МЭС с высокой степенью достоверности можно установить по результатам испытаний единичных пневматических колес [7; 8].

На машинно-тракторный агрегат на базе колесных МЭС при выполнении им основных полевых работ воздействуют внешние управляющие и возмущающие факторы [9; 10]. Под управляющим фактором понимается воздействие оператора на рулевое колесо, а к возмущающим факторам в первую очередь относится отклоняющий момент от машины-орудия, а также поперечный уклон поверхности обрабатываемого поля и другие факторы. При этом качение колес МЭС происходит с боковым уводом шин, что обуславливает уменьшение некоторых функциональных показателей [11–13].

Целью настоящего исследования является установление зависимости энергетических показателей шины в общем случае качения колеса мобильного сельскохозяйственного средства.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Решению проблемы повышения тягово-энергетических свойств наземных транспортно-технологических средств посвящены многие научно-исследовательские работы. Зарубежными и отечественными учеными проводились изыскания возможности увеличения эксплуатационных показателей практически по двум направлениям. Первое направление предусматривало работу сельскохозяйственных агрегатов на повышенных скоростях, второе – увеличение ширины захвата [3; 5]. Однако стремление к повышению эффективности работы сельскохозяйственных МТА за счет реализации мероприятий в первом и во втором направлениях обуславливает повышение массы МЭС [14] и неизбежный рост уровня динамических воздействий внешних и внутренних сил и моментов, возникающих в опорных основаниях и звеньях агрегатов. Это, как известно, способствует значительному снижению тягово-энергетических, агротехнических и эксплуатационных показателей МТА [15–17].

В научных работах вышеупомянутых ученых представлены результаты исследований энергетических показателей колесных движителей МЭС, в которых приводятся различные математические зависимости для определения максимально возможного достижения величины развиваемой ими касательной силы, учитывающие коэффициенты сопротивления их качению и сцепления пневматика с почвенным основанием.

Многие современные исследователи с целью снижения негативного влияния динамических процессов на тягово-энергетические и эксплуатационные показатели МТА [18] предлагают вводить в трансмиссию МЭС дополнительные автоматически подключаемые и отключаемые инерционные массы [6; 19], пневмогидравлические планетарные муфты сцепления [20], упругодемпфирующие механизмы [21–23], устанавливать различного рода упругие элементы в систему навески [24; 25] и в сцепные элементы их с сельскохозяйственными орудиями и машинами [26].

Производительность МТА можно определить по зависимости [5; 27]:

$$W = C\frac{N_{en}}{K_a}\eta_T\varepsilon_N T_{ch}\tau,$$

где C – коэффициент пропорциональности, величина которого зависит от вида технологической операции; N_{en} – номинальное значение мощности двигателя МЭС, кВт; K_a – удельное сопротивление сельскохозяйственной машины; η_T – тяговый КПД МЭС; ε_N – коэффициент использования номинальной мощности двигателя; T_{ch} – длительность смены, ч; τ – коэффициент использования времени смены.

Анализом данного выражения установлено, что на производительность МТА на базе колесного МЭС влияет много факторов и параметров [3; 28; 29], в том числе тяговый КПД [28–30], величина которого определяется в большей мере совершенством шин движителей его ходовых систем.

В результате исследований тягово-сцепных качеств движителей, которые осуществлялись с целью повышения их тягового КПД, было доказано, что повышение

показателей функционирования мобильной сельскохозяйственной техники можно добиться путем выбора модели и габаритных размеров шин [31; 32], оптимизации внутреннего армирования шин [33], установкой сдвоенных колес [34; 35], использованием принципиально новых материалов [36], разработкой шин нового конструктивного решения [37] и т. д. Анализ исследований качения движителей показал, что они производились в основном для прямолинейного движения, и лишь в немногих работах [10; 12; 38] рассматривались вопросы их тяговой энергетики с боковым уводом, что характерно для реальной эксплуатации.

Выдвинута следующая научная гипотеза: повышение тягово-энергетических показателей мобильной сельскохозяйственной техники можно обеспечить за счет снижения затрат энергии при боковом уводе движителей МЭС.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования

Процесс взаимодействия с агрофоном при движении с боковым уводом серийно выпускаемых шин моделей Ф-81, ФД-12 и Ф-85, применяемых для комплектования ходовых систем тракторов пятого класса тяги, является объектом исследования.

Материалы, методы, оборудование и процедура исследования

Для достижения цели исследований в работе принят теоретико-экспериментальный метод.

Для определения деформационных свойств крупногабаритных шин на бетоне с помощью «шинного тестера» [39] нами разработано специальное устройство, состоящее из подвижных кареток в количестве трех. Оно закреплялось на оси испытываемого колеса.

Расположение кареток сориентировано для измерения деформаций шины в радиальном, боковом и окружном направлениях, причем все устройство было закреплено на оси колеса и привязано к экватору грунтозацепов шины. Наличие реохордных датчиков в подвижных звеньях кареток способствовало обеспечению непрерывной записи при каждом обороте пневматического колеса процессов различного деформирования шины с помощью регистрирующей аппаратуры.

Полевые исследования пневматических колес проводились на измерительном комплексе «шинный тестер» [39], который обеспечивал получение всех необходимых данных для установления степени влияния перемещения движителей с уводом на тягово-энергетические показатели тракторов пятого класса тяги.

Основной задачей полевых исследований было определение тягово-энергетических свойств шин, устанавливаемых на ходовые системы МЭС пятого класса тяги в общем случае движения.

Оценку тягово-энергетических свойств МЭС производят по следующим показателям [38]:

– средней скорости движения $\bar{V}$, км/ч:

$$\bar{V} = \frac{s}{\tau};$$

– крюковой мощности N_T, кВт:

$$N_T = \frac{\bar{P}_T \cdot \bar{V}}{3\,600};$$

– расходу топлива Q_T, кг/ч:

$$Q_T = \frac{\Delta m_T}{\tau}, \text{ или } Q_T = \frac{\Delta V \cdot \rho}{\tau};$$

– удельному расходу топлива q, кг/(кВт·ч):

$$q = \frac{Q_T}{N_T} 10;$$

– буксованию δ для каждого движителя, %:

$$\delta = \left(1 - \frac{n_0'}{n_0}\right) 100;$$

– условному тяговому КПД η_{TY} по передачам:

$$\eta_{TY} = \frac{N_{T\max}}{N_{0\max}},$$

где S – путь, пройденный мобильным энергетическим средством, км; τ – время опыта, ч; $\bar{P}_T$ – среднее тяговое (крюковое) усилие, Н; Δm_T, ΔV – отклонения показаний за время проведения опыта весового или объемного устройства для определения расхода топлива; ρ – удельный вес топлива при проведении эксперимента, кг/см^3; $\acute{n}_0$, n_0 – частота вращения ведущего колеса МЭС соответственно без крюковой нагрузки с ней на одинаковой зачетной длине, мин$^{-1}$; $N_{T\max}$ – максимальная крюковая мощность, кВт; $N_{0\max}$ – максимальные значения соответственно мощности двигателя и крюковой мощности МЭС на i-той передаче, кВт.

Полевые испытания пневматических колес на различных шинах с целью установления их тягово-энергетических свойств при качении с уводом проводили на различных агрофонах (табл. 1) по ГОСТ 7057-2001[1] и ГОСТ 20915-2011[2].

Движение «шинного тестера» осуществлялось со скоростью 5…6 км/ч. Расстояние между соседними проходами 5…6 м. С целью достижения необходимой достоверности зачетный участок выбирался длиной от 400 до 500 м, что способствовало получению значений измеряемых величин с 50–60-кратной повторностью.

[1] ГОСТ 7057-2001. Тракторы сельскохозяйственные. Методы испытаний [Электронный ресурс]. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200030186 (дата обращения: 26.01.2025).

[2] ГОСТ 20915-2011. Испытания сельскохозяйственной техники. Методы определения условий испытаний [Электронный ресурс]. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200094197 (дата обращения: 26.01.2025).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Натурные испытания колес на пневматических шинах на почвенных опорных основаниях показывают, что сопротивление качению колеса зависит от вида его нагружения.

Тяговый КПД η_T как интегральный показатель тягово-энергетических свойств движителей МЭС определялся по широко известной зависимости:

$$\eta_T = \frac{P_T \cdot V}{M_K \cdot \omega_K}, \quad (1)$$

где P_T – тяговое (крюковое) усилие, развиваемое движителем, Н; V – поступательная скорость движителя, м/с; M_K – крутящий момент, приложенный к ведущей оси движителя, Н · м; ω_K – угловая скорость движителя, с$^{-1}$.

Таблица 1
Table 1

Показатели почвенного основания на агрофонах
Indicators of the soil base for soil preparation

Показатели почвенного основания / Indicators of the soil base		Агрофон / Soil preparation	
		Стерня / Stubble	Поле под посев / The field for sowing
Неплоскостность поверхности участка, мм / The non-flatness of the site surface, mm		15	19
Уклон участка в габаритных размерах «шинного тестера», % / The slope of the site in the outline dimensions of the “tire tester”, %	Вдоль поля / Along the field	< 2	< 3
	Поперек поля / Across the field	< 5	< 4
Влажность почвы в слоях, % / Soil moisture of soil layers, %	0…5 см / cm	12,80	9,90
	5…10 см / cm	15,70	19,80
	10…15 см / cm	16,40	22,70
Твердость в слоях почвы, МПа / Hardness of soil layers, MPa	0…5 см / cm	0,34	0,19
	5…10 см / cm	1,75	1,18
	10…15 см / cm	3,02	1,37

В общем случае (рис. 1) при действии на колесо продольной P_x и боковой P_y сил движение его осуществляется с боковым уводом под углом Θ_y, а в пятне контакта шины с поверхностью качения появляются продольная R_x и боковая R_y реакции, а также стабилизирующий момент M_{cm}, по величине равный поворачивающему моменту, возникающему при действии остова мобильного средства M_n.

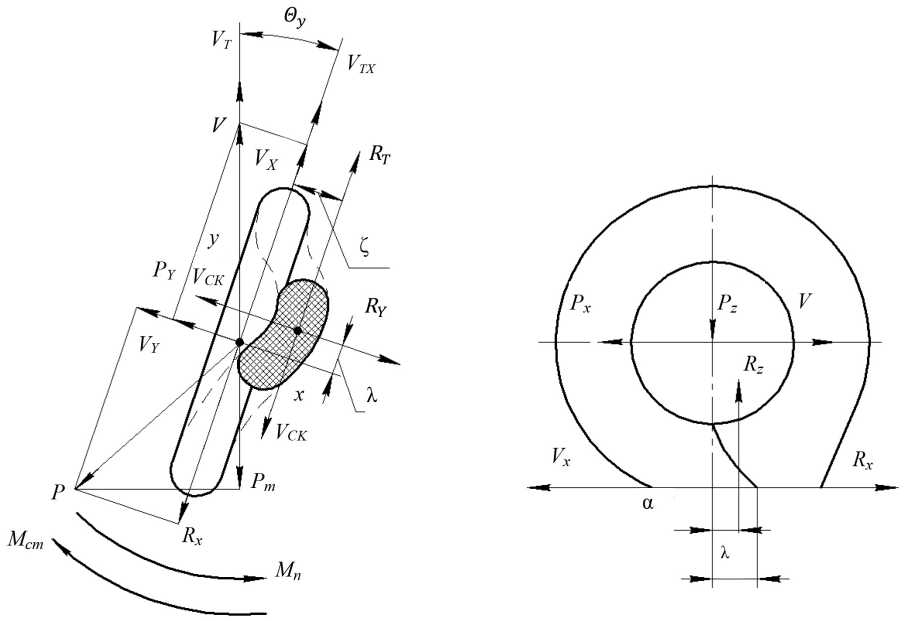
Полезной мощностью движителя N_T будет работа, совершаемая в единицу времени, действующая на колесо со стороны остова мобильного средства результирующей силой P в направлении движения:

$$N_T = P \cdot V \cos\left(\bar{P}, \bar{V}\right),$$

или

$$N_T = \left(P_x \cos\Theta_y - P_y \sin\Theta_y\right)V,$$

где $P_x \cos\Theta_y - P_y \sin\Theta_y = P_T$ – тяговое усилие, развиваемое движителем.



Р и с. 1. Принципиальная схема качения колесного движителя
F i g. 1. Schematic diagram of a wheel propeller rolling

Источник: здесь и далее в статье схемы составлены авторами.
Source: hereinafter in this article the diagrams are compiled by the authors.

Для существующих в реальной эксплуатации углов увода

$$\cos\Theta_y \approx 1, \quad \sin\Theta_y \approx \Theta_y,$$

и в соответствии с этим

$$P_y \approx K_y \Theta_y,$$

где K_y – коэффициент сопротивляемости суммарному уводу при качении движителя с буксованием [13; 38]:

$$K_y = \frac{1-\delta}{\frac{1}{K_0} + \frac{\delta}{P_x}}, \tag{2}$$

где K_0 – коэффициент сопротивляемости уводу шины в зависимости только от ее боковой эластичности [13; 38].

Исходя из того, что согласно диаграмме силового нагружения

$$M_K = M_K^0 + P_x r; \quad r = r_K^0 + k; \quad V = \omega_K r_K,$$

и

$$\frac{r_K}{r_K^0} = 1 - \delta,$$

зависимость (1) с учетом формулы (2) можно представить в виде

$$\eta_m = \frac{1-\frac{1-\delta}{\delta+\frac{P_x}{K_0}}\Theta_y^2}{1+\frac{M_K^0}{P_x}} \cdot \frac{1-\delta}{1+\frac{k}{r_K^0}}, \quad (3)$$

а тяговое усилие, создаваемое колесным движителем, будет равно

$$P_T = \left(P_x - P_y\Theta_y\right) = P_x\left(1-\frac{1-\delta}{\delta+\frac{P_x}{K_0}}\Theta_y^2\right). \quad (4)$$

В зависимости принято обозначение: k – кривизна линии, пролегающей посередине протектора шины в центре контакта колеса с почвенным основанием:

$$k = \alpha_1 \cdot \gamma - \alpha_2 \cdot \gamma,$$

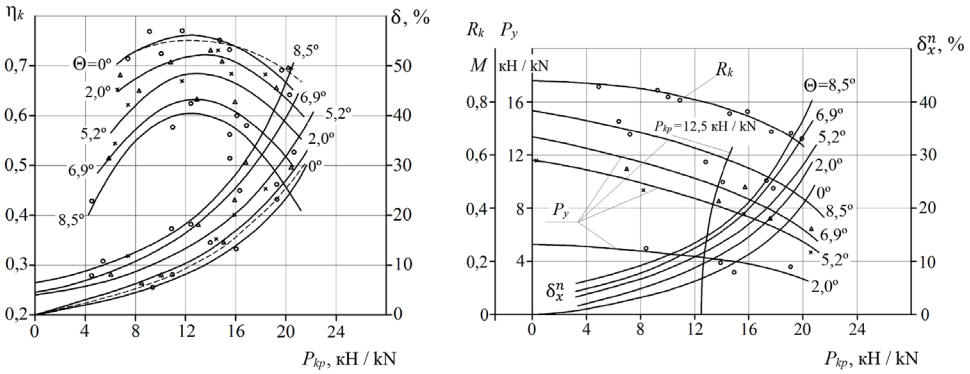
где α_1, α_2 – коэффициенты кривизны, определяемые экспериментально; γ – угол между касательной к линии перемещения колеса и продольной плоскостью движителя.

Анализ зависимостей (3) и (4) однозначно показывает, что при движении шины с боковым уводом тягово-энергетические показатели движителя снижаются: с ростом угла увода Θ_y тяговое усилие P_m, создаваемое ведущим колесом, и его тяговый КПД η_m становятся меньше. Это объясняется возникновением дополнительных потерь при движении колеса в элементах шины и почвенном основании, а также противодействием составляющей боковой силы тяговому усилию. При этом процесс качения с боковым уводом сопровождается повышенным буксованием движителя за счет увеличения деформации сдвига почвы, что определяет снижение η_m.

Сказанное отражают графические зависимости $\eta_m(P_m)$, $\delta(P_m)$, представленные на рисунке 2.

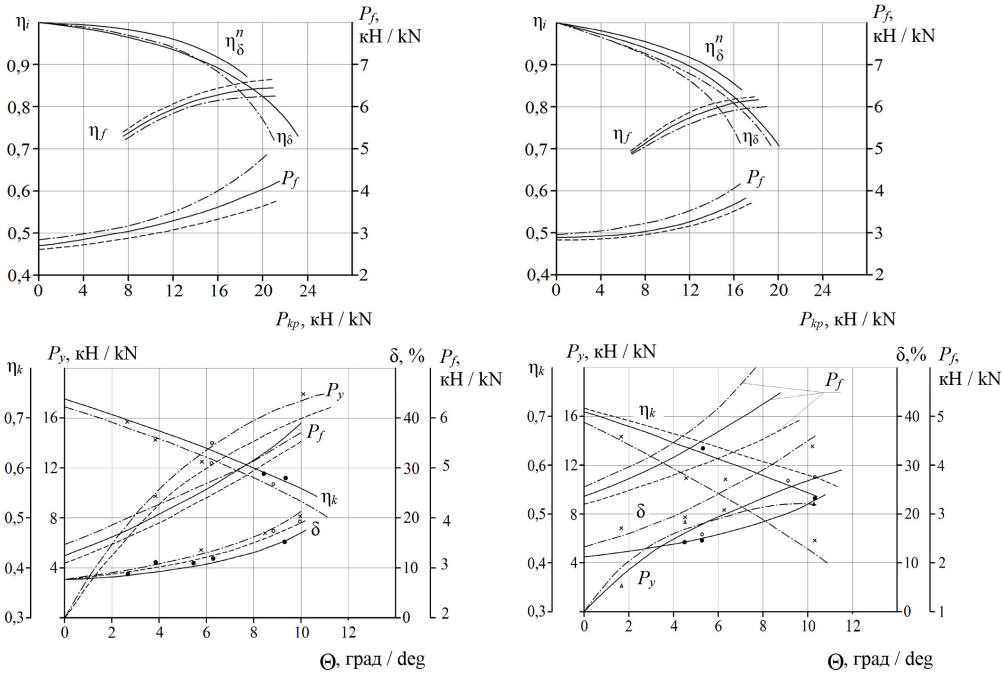
Данные испытаний шины 30,5R-32 [10; 38] на модуле «шинный тестер» [39] однозначно показывают смещение графиков, отображающих функции $\eta_m(P_m)$, с ростом угла ее бокового увода в сторону снижения тягового КПД и усилия тяги, в то время как графики функций $\delta(P_m)$ смещаются в сторону возрастания значений буксования.

Построенные зависимости $\eta_m(P_m)$, $\delta(P_m)$ при заданном P_m = const (рис. 3) однозначно демонстрируют снижение тяговой характеристики движителей ходовых систем, а значит и энергетического средства в целом при уводе шин. Уже при незначительных углах увода шины (1,5…2,5°) буксование увеличивается на 25 %, что реально для рядовой эксплуатации МЭС.



Р и с. 2. Графическое отображение тяговой характеристики движителя, укомплектованного шиной 30,5R-32 с давлением воздуха P_W = 160 кПа, с нормальной нагрузкой 40 кН на стерне озимой пшеницы:
------ – расчетные кривые; ——— – опытные кривые

F i g. 2. Graphical representation of the traction characteristics of a propeller equipped with a 30.5R-32 tire with air pressure P_W = 160 kPa, with a basic load of 40 kN on winter wheat stubble:
------ – theoretical curves; ——— – experimental curves



Р и с. 3. Графическое отображение зависимости тяговых показателей шин моделей 28,1R-26 (- - - - - -), 30,5R-32 (———) и 24,5R32 (— · — · —):
а) от величины бокового увода на стерне зерновых колосовых;
b) поле под посев (P_m = 12,5 кН; P_W = 160 кПа)

F i g. 3. Graphical representation of the dependence of traction parameters of the tire models 28.1R-26 (- - - - - -), 30.5 R-32 (———) and 24.5R32 (— · — · —):
a) on the value of lateral withdrawal on the stubble of grain ears;
b) the field for sowing (P_m = 12.5 kN; P_W = 160 kPa)

С целью уточнения факторов, влияющих на тяговое усилие P_T и скорость движения ведущего колеса V, составим модель его качения по деформируемому почвенному основанию, используя теоретические материалы предыдущих исследований [13; 38].

Для этого реакции почвенного основания, которое деформируется при воздействии на него эластичными колесами, выразим с помощью величины потенциальной энергии, возникающей при различных деформациях шины:

$$R_x = c_\lambda \cdot \lambda; \quad R_y = c_\zeta \cdot \zeta; \quad M_{cm} = c_\gamma \frac{a_1}{a_2} \zeta,$$

где λ, ζ – соответственно продольная и боковая деформации эластичной шины; c_ζ, c_λ, c_γ – соответственно коэффициенты, характеризующие боковую, продольную и угловую жесткость пневматической шины, определяемые экспериментально; a_1, a_2 – определяемые экспериментально параметры кривизны линии качения оболочки шины по центральной части пятна контакта.

Уравнения перемещения эластичного колеса при ведущем режиме нагружения:

– при перемещении его в продольном ($P_y = 0$) направлении:

$$V = \omega_K \cdot r_K^c \left(1 - \frac{\varepsilon + K_{com}}{r_K^c} \lambda\right) - \dot{\lambda}; \tag{5}$$

– при перемещении его с боковым уводом:

$$\dot{y} + \dot{\zeta} + V \frac{a_1}{a_2}\left(1 + f_{sl}\right)\zeta = 0, \tag{6}$$

где r_K^c – кинематический радиус эластичного колеса при его движении в свободном режиме нагружения ($P_x = 0$); ε, K_{com}, f_{sl} – коэффициенты, характеризующие соответственно процессы сжатия набегающих волокон оболочки шины под воздействием продольной реакции P_x, проскальзывания шины по опорной поверхности вдоль и поперек направления движения; $\dot{y}$ – скорость оси колеса в поперечном направлении.

Коэффициенты K_{com} и f_{sl} показывают, что при проскальзывании шины относительно опорного основания ее деформация становится меньше, чем при движении колеса без скольжения. Причем, чем больше проскальзывают элементов протектора шины в пятне контакта, тем величина коэффициентов K_{com} и f_{sl} выше, а когда по поверхности опорного основания контактный отпечаток скользит полностью, значения их стремятся к бесконечности.

Скольжение всех элементов контактного отпечатка шины колеса по поверхности почвенного основания характеризуется коэффициентом буксования. Величины коэффициентов K_{com} и f_{sl}, учитывающие проскальзывание только некоторой части пятна контакта шины с почвой, с увеличением значения коэффициента буксования стремятся асимптотически к их предельным значениям.

Так как при проведении экспериментальных исследований определить величины ε и K_{com} отдельно не представляется возможным, при определении буксования движителя ($\delta > 0$) принимаем $\varepsilon + K_{com} = k_x$ и $f_{sl} = k_y$, потому что на почвенном основании переходный процесс от проскальзывания только некоторых элементов

пятна контакта шины до полного его скольжения занимает очень короткий промежуток времени. Поэтому в практике с небольшой погрешностью принимают, что скольжение только некоторых элементов шины в пятне контакта с почвой при действии создаваемого движителем усилия тяги не бывает.

При установившемся движении колеса $\left(\dot{\lambda}=0\right)$ без увода и буксования его скорость определяют с учетом уравнения (5) по зависимости:

$$V' = \omega_K \cdot r_K^c \left(1 - \frac{k_x \cdot \lambda}{r_K^c}\right).$$

Коэффициент буксования δ_x^{sl}, определяющего сдвиг почвенного основания, о котором говорилось ранее, можно определить по зависимости:

$$\delta_x^{sl} = \frac{V_{\delta x}}{\omega_K \cdot r_K^c \left(1 - \frac{k_x \cdot \lambda}{r_K^c}\right)}. \quad (7)$$

Тогда поступательная скорость движителя с учетом скорости буксования $V_{\delta x}$ станет меньше:

$$V = V' - V_{\delta x}, \quad (8)$$

и на основании (7) и (8) запишется в виде:

$$V = \omega_K \cdot r_K^c \left(1 - \frac{k_x \cdot \lambda}{r_K^c}\right)\left(1 - \delta_x^{sl}\right). \quad (9)$$

Так как $V = \omega_K \cdot r_K^c$, то из уравнения (9) можно записать:

$$r_K = r_K^c \left(1 - \frac{k_x \cdot \lambda}{r_K^c}\right)\left(1 - \delta_x^{sl}\right),$$

где r_K – кинематический радиус движителя, м.

Отсюда происходит уменьшение скорости и кинематического радиуса движителя за счет деформации элементов шины в продольном направлении и проскальзывания их относительно почвенной поверхности. При проведении тяговых испытаний мобильных энергетических средств и отдельных движителей эти факторы каждый сам по себе определить пока невозможно, так как по ГОСТ 7057-2001[3] скорость движения определяется в зависимости от пройденного пути S за время τ, а коэффициент буксования – по зависимости:

$$\delta = \frac{n_K - n_{xx}}{n_K},$$

где n_{xx}, n_K – частота вращения движителя соответственно МЭС на холостом ходу и с крюковой нагрузкой на зачетном участке одинаковой длины, мин$^{-1}$.

Поскольку

$$n_K = \frac{s}{2\pi r_K}, \text{ а } n_{xx} = \frac{s}{2\pi r_K^c},$$

[3] ГОСТ 7057-2001. Тракторы сельскохозяйственные. Методы испытаний.

после некоторых преобразований можно получить:

$$V = \omega_K \cdot r_K^c \left(1 - \delta\right). \tag{10}$$

Тогда на основании выражений (9) и (10) получим:

$$\delta = \delta_x^{sl} + \frac{k_x \lambda}{r_K^c} - \delta_x^{sl} \frac{k_x \lambda}{r_K^c}. \tag{11}$$

В реальных условиях эксплуатации при качении пневматического колеса в ведущем режиме значение последнего составляющего (11) пренебрежимо мало, поэтому

$$\delta = \delta_x^{sl} + \frac{k_x \lambda}{r_K^c}. \tag{12}$$

Первое слагаемое в (12) зависит от скольжения контактного отпечатка шины по почвенному основанию δ_Z^{sl}, второе – от ее тангенциальной податливости. Вторую составляющую (12) в научной литературе принято именовать как коэффициент псевдобуксования движителя. Такое представление процесса буксования способствует уточнению потерь мощности, происходящих в движителе мобильного энергетического средства, что позволяет аргументированно определить параметры армирования оболочек шин.

В общем виде $\left(P_y > 0,\ \delta_x^{sl} > 0\right)$ уравнение (6), описывающее процесс качения движителя с боковым уводом при скольжении его элементов, находящихся в контакте с почвой со скоростью $V_{\delta y}$ перпендикулярно направлению движения получит вид:

$$\dot{\zeta} + V' \frac{a_1}{a_2}\left(1 + k_y\right)\zeta + V_\delta = \dot{y}. \tag{13}$$

Для установившегося $\left(\zeta \doteq 0\right)$ качения движителя с уводом уравнение (13) можно представить так:

$$V' \frac{a_1}{a_2}\left(1 + k_y\right)\zeta + V_\delta = \dot{y}. \tag{14}$$

Скорость V' в зависимостях (13) и (14) устанавливает значение средней скорости протектора шины в контакте с почвенным основанием.

Скорость V пневматического колеса при перемещении его с уводом определится (рис. 2) в виде двух ее составляющих:

– продольная скорость:

$$V_x = V \cos\Theta_y; \tag{15}$$

– поперечная скорость:

$$\dot{y} = V_y = V \sin\Theta_y.$$

Продольную скорость пневматического колеса V_x можно определить по зависимости (9), а поперечную V_y – по зависимостям (13), (14).

Получение тягового усилия движителя $P_T = P_x \cos\Theta_y - P_y \sin\Theta_y$ при движении с боковым уводом такой же величины как без увода, возможно только при росте продольной силы P_x. Это будет способствовать росту коэффициента буксования δ_x^n и снижению, согласно (9) и (15), продольной V_x и поступательной V скоростей перемещения ведущего колеса.

Увеличение значения коэффициента δ_x^{sl} у движителя, перемещающегося с уводом будет наблюдаться и при фиксированном значении P_x, потому что при одновременном продольном и боковом скольжении элементов контактного отпечатка шины сильнее нарушается связность почвы.

Кроме буксования, значение тягового КПД движителя определяет и его сопротивление самопередвижению. Величину сопротивления самопередвижению можно определить или как работу трения качения Z_{TK}, или как условный момент M_f.

Следует заметить, что при перемещении пневматического колеса разделение затрат мощности на буксование и сопротивление самопередвижению чисто условно. Традиционно при рассмотрении мощностного баланса движителя предполагается, что сначала необходимо учитывать потери мощности на его буксование, а потом – на самопередвижение. Поэтому потери мощности на самопередвижение N_f определяются поступательной скоростью V. На самом деле потери энергии на деформации в шине и почвенного основания присутствуют при качении колеса независимо от величины поступательной скорости V. Например, при возникновении стопроцентного буксования движитель вращается, но стоит на месте ($V = 0$).

Гистерезисные потери в шине движителя приводят к снижению доли мощности, которая подводится к контактной поверхности колеса с почвенным основанием и определяет его буксование. Поэтому определение потерь мощности на буксование в виде произведения осевой мощности на величину коэффициента буксования нам представляется необоснованным.

Тяговый КПД движителя представим в виде работы, совершаемой тяговым усилием за один его оборот отнесенной к работе крутящего момента, подводимого к ведущей оси:

$$\eta_T = \frac{P_T \cdot S}{M_K 2\pi}.$$

С учетом псевдобуксования шины, возникающего под действием продольной деформации, без затрат мощности на ее качения Z_{TK} и на буксование $Z_{\delta\Sigma}$ можно записать:

$$P_m \cdot S = M_K 2\pi - Z_{TK} - Z_{\delta\Sigma},$$

тогда

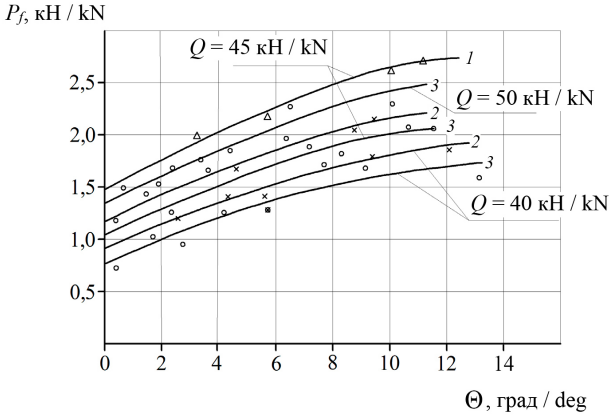
$$\eta_T = \frac{M_K 2\pi - Z_{TK} - Z_{\delta\Sigma}}{M_K 2\pi} = \frac{M_K 2\pi - Z_{TK}}{M_K 2\pi} \frac{\left(M_K 2\pi - Z_{TK}\right) - Z_{\delta\Sigma}}{\left(M_K 2\pi - Z_{TK}\right)} =$$

$$= \left(1 - \frac{\frac{Z_{TK}}{2\pi}}{M_K}\right)\left(1 - \frac{Z_{\delta\Sigma}}{M_K 2\pi - Z_{TK}}\right). \quad (16)$$

Заметим, что

$$Z_{\delta\Sigma} = P_T S_{\delta\Sigma}, \quad P_T L = M_K 2\pi - Z_{TK},$$

где $S_{\delta\Sigma}$ – снижение пройденного пути колесом за один его оборот из-за возникновения суммарного буксования движителя; L – длина периметра испытываемого колеса.



Р и с. 4. Графическое отображение силы сопротивления самопередвижению колеса на шине 30,5R-32 в ведомом режиме нагружения в зависимости от величины угла увода: *1* – P_W = 100 кПа; *2* – P_W = 130 кПа; *3* – P_W = 160 кПа

F i g. 4. Graphical representation of the resistance force to self-movement of the wheel on the tire 30.5R-32 in the slave loading mode, depending on the magnitude of the slip angle: *1* – P_W = 100 kPa; *2* – P_W = 130 kPa; *3* – P_W = 160 kPa

Следовательно, в полученной зависимости (16) первый сомножитель характеризует потери на качение η_f пневматика, второй – потери на его буксование η_δ, или

$$\eta_T = \eta_f \eta_\delta,$$

где

$$\eta_f = 1 - \frac{\frac{Z_{TK}}{2\pi}}{M_K} = \left(1 - \frac{M_f}{M_K}\right);$$

$$\eta_\delta = 1 - \frac{P_T S_{\delta\Sigma}}{P_T L} = \left(1 - \delta_\Sigma\right).$$

По установленным величинам η_T, M_K, и δ_Σ (на рисунке 3b) несложно определить значение так называемого условного момента сопротивления самопередвижению M_f пневматика и силы его сопротивления качению P_f:

$$M_f = M_K \left(1 - \frac{\eta_T}{1-\delta}\right), \qquad P_f = \frac{M_f}{r_K^0}. \tag{17}$$

Полученные для шины 30,5R-32 по зависимости (17) силы P_f от угла бокового увода в ведущем режиме колеса показаны на рисунке 3.

На рисунке 4 показаны зависимости силы $P_f\left(\Theta\right)$ при качении колеса в ведомом режиме нагружения [38].

Зависимости силы $P_f\left(\Theta\right)$ наглядно доказывают, что сопротивление качению пневматического колеса при ведомом и ведущем режимах нагружения имеет разный характер: на ведущем режиме оно больше по величине, темп его увеличения также с ростом угла бокового увода более высокий. Таким образом, здесь первостепенное значение оказывает работа трения качения из-за процесса деформирования оболочки пневматической шины.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ аналитических и экспериментальных исследований движения пневматического колеса в общем виде доказывает снижение тяговых свойств пневматических колес при их движении с уводом (при углах увода шины 1,5…2,5° потери энергии на буксование увеличиваются до 25 %). В то же время при увеличении угла увода сопротивление самопередвижению ведущего пневматического колеса выше по величине с более высоким темпом его роста, чем ведомого.

Установлено распределение влияния на тяговый КПД движителя при его качении с боковым уводом главных факторов: в сумме затрат мощности на долю буксования колеса на шине 30,5R-32 приходится 37…46 % (9…12 % из них обусловлены псевдобуксованием), а на сопротивление самопередвижению – 54…63 %.

Таким образом, затраты мощности на преодоление сопротивления самопередвижению преобладающие. Этот факт необходимо учитывать при разработке различных конструктивных мероприятий с целью совершенствования шин ходовых систем МСА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Терновых К.С., Четверова К.С. Состояние и тенденции развития технической базы сельскохозяйственных предприятий. *Intenational Agricultural Journal.* 2022;65(6):25. https://doi.org/10.55186/25876740_2022_6_6_25
2. Немцев А.Е., Вахрушев В.В., Деменок И.В. Обновление машинно-тракторного парка АПК Сибирского федерального округа. *Механизация и электрификация сельского хозяйства.* 2022;(55):220–222. URL: https://mechel.belal.by/jour/article/view/726 (дата обращения: 20.03.2025).
3. Годжаев Т.З., Зубина В.А., Малахов И.С. Обоснование функциональных характеристик сельскохозяйственных мобильных энергетических средств в многокритериальной постановке. *Тракторы и сельхозмашины.* 2022;89(6):411–420. https://doi.org/10.17816/0321-4443-121325
4. Драгуленко В.В. Харитонов В.В. Динамика качения колеса с пневматической шиной при переменной вертикальной нагрузке. *Научный журнал КубГАУ.* 2024;198(4):1–10. URL: https://ej.kubagro.ru/2024/04/pdf/08.pdf (дата обращения: 20.03.2025).
5. Хафизов К.А., Хафизов Р.Н., Тюрин И.Ю., Левченко Г.В., Гамаюнов Д.В., Лушников А.А. Оптимальные параметры трактора и пахотного агрегата по различным критериям оптимизации. *Аграрный научный журнал.* 2023;(1):155–160. https://doi.org/10.28983/asj.y2023i1pp155-160
6. Ovchinnikov A.S., Kuznetsov N.G., Nekhoroshev D.D., Gapich G.S., Nekhoroshev D.A., Fomin S.D., et al. Some Ways to Reduce the Dynamic Loads of Agricultural Machine-Tractor

Aggregates. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences.* 2018;13(22):8776–8779. URL: https://www.arpnjournals.org/jeas/research_papers/rp_2018/jeas_1118_7388.pdf (дата обращения: 20.03.2025).
7. Маршанин Е.В., Кузнецов Е.Е., Щитов С.В., Митрохина О.П., Кидяева Н.П., Ковалевский В.Н. Направления исследований для снижения силы сопротивления движению колесного энергетического средства. *Аграрный научный журнал.* 2023;(7):147–152. https://doi.org/10.28983/asj.y2023i7pp147-152
8. Анисимов Н.Л. Методика рационального выбора комплекта пневматических шин для сельскохозяйственного трактора. *Тракторы и сельхозмашины.* 2022;89(6):421–429. https://doi.org/10.17816/0321-4443-109895
9. Новиков В.В., Поздеев А.В., Еронтаев В.В., Чумаков Д.А., Колесов Н.М., Тимошин Н.В., и др. Экспериментальное определение боковой жесткости пневматического колеса трактора МТЗ-82 «БЕЛАРУС». *Тракторы и сельхозмашины.* 2023;90(2):123–132. https://doi.org/10.17816/0321-4443-280225
10. Belyaev A.N., Shatsky V.P., Kozlov V.G., Trishina T.V., Vysotskaya I.A. Determination of Theoretical Path of Vehicle Motion upon Cornering. *Journal of Applied Science and Engineering.* 2022;25(5):893–899. https://doi.org/10.6180/jase.202210_25(5).0004
11. Беляев А.Н., Шацкий В.П., Гулевский В.А., Тришина Т.В. Оценка бокового отклонения колесной машины от заданной траектории движения. *Сибирский вестник сельскохозяйственной науки*. 2022;52(4):120–128. https://doi.org/10.26898/0370-8799-2022-4-13
12. Беляев А.Н., Оробинский В.И., Гулевский В.А., Тришина Т.В., Высоцкая И.А. Боковые силы на колесах трактора при входе в поворот. *Вестник Воронежского государственного аграрного университета.* 2021;(2):29–38. https://doi.org/10.17238/issn2071-2243_2021_2_29
13. Кравченко В.А., Меликов И.М. Оценка сопротивляемости уводу крупногабаритных шин движителей трактора тягового класса 5. *Научный журнал КубГАУ.* 2021;(169):191–204. https://elibrary.ru/gyfxgd
14. Keller T., Sandin M., Colombi T., Horn R., Or D. Historical Increase in Agricultural Machinery Weights Enhanced Soil Stress Levels and Adversely Affected Soil Functioning. *Soil and Tillage Research.* 2019;194:104293. https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104293
15. Moinfar A., Shahgholi G., Gilandeh Yo.A., Kaveh M., Szymanek M. Investigating the Effect of the Tractor Driving System Type on Soil Compaction Using Different Methods of ANN, ANFIS and Step Wise Regression. *Soil and Tillage Research.* 2022;222:105444. https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105444
16. Mileusnić Z.I., Satjnikov E., Radojević R.L., Petrović D.V. Soil Compaction Due to Agricultural Machinery Impact. *Journal of Terramechanics.* 2022;100:51–60. https://doi.org/10.1016/j.jterra.2021.12.002
17. Moinfar A., Shahgholi G., Abbaspour-Gilandeh Yo., Herrera-Miranda I., Hernández-Hernández J.L., Herrera-Miranda M.A. Investigating the Effect of the Tractor Drive System Type on Soil Behavior Under Tractor Tires. *Agronomy.* 2021;11(4):696. https://doi.org/10.3390/agronomy11040696
18. Kravchenko V., Kravchenko L., Zhurba V., Senkevich S., Duryagina V. Reducing the Dynamic Loading of the Links of the Machine-Tractor Unit Aggregated by the Mobile Power Vehicle of the 1.4 Drawbar Category. In: Networked Control Systems for Connected and Automated Vehicles (16 November 2022). p. 2043–2052. https://doi.org/10.1007/978-3-031-11051-1_210
19. Кравченко В.А. Результаты испытаний машинно-тракторного агрегата на базе трактора класса 1,4 с переменной вращающейся массой двигателя. *Научный журнал КубГАУ.* 2014;(99). URL: https://ej.kubagro.ru/2014/05/pdf/15.pdf (дата обращения: 20.03.2025).
20. Nekhoroshev D.D., Nekhoroshev D.A., Konovalov P.V., Popov A.Yu. Research on Experimental Machine-Tractor Aggregates Equipped with Pneumatic Hydraulic Planetary Clutch at Roag Works. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Mathematical Modeling of Technical and Economic Systems in Agriculture III-2020 (10–11 December 2020). https://doi.org/10.1088/1755-1315/786/1/012016

21. Senkevich S., Bolshev V., Ilchenko E., Chakrabarti P., Jasiński M., Leonowicz Z., et al. Elastic Damping Mechanism Optimization by Indefinite Lagrange Multipliers. *IEEE Access.* 2021;9:71784–71804. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3078609
22. Senkevich S., Kravchenko V., Lavrukhin P., Ivanov P., Senkevich A. Theoretical Study of the Effect of an Elastic-Damping Mechanism in the Tractor Transmission on a Machine-Tractor Unit Performance While Sowing. In: Handbook of Research on Smart Computing for Renewable Energy and Agro-Engineering. IGI Global Scientific Publishing, 2020. p. 423–463. https://doi.org/10.4018/978-1-7998-1216-6.ch017
23. Kravchenko V., Kravchenko L. In the Transmission of the 1,4 Drawbar Category Mobile Power Vehicle on the Performance Indicators of Machine and Tractor Units. In: XV International Scientific Conference on Precision Agriculture and Agricultural Machinery Industry "State and Prospects for the Development of Agribusiness – INTERAGROMASH 2022". 2022;363:03022. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202236303022
24. Kuznetsov N.G., Shatokhin A.A., Nekhoroshev D.D., Fomin S.D., Nekhoroshev D.A. Mathematical Model Studying the Operation of a Machine-Tractor Unit with a Tractor "DT-175S" Wit an Elastic Element in the Linkage System. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference on Engineering Studies and Cooperation in Global Agricultural Production (27–28 August 2020). 2021;659:012076. https://doi.org/10.1088/1755-1315/659/1/012076
25. Беляев А.Н., Афоничев Д.Н., Тришина Т.В., Новиков А.Е., Шередекин П.В., Высоцкая И.А. Влияние жесткости навесной системы на устойчивость криволинейного движения машинно-тракторного агрегата. *Наука в Центральной России.* 2023;(2):115–126. https://doi.org/10.35887/2305-2538-2023-2-115-126
26. Иовлев Г.А., Голдина И.И. Зависимость тяговых свойств трактора от типа соединения с сельскохозяйственной машиной. *Сельскохозяйственные машины и технологии.* 2023;17(4):75–81. https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-4-75-81
27. Ленский А.В., Жешко А.А. Разработка алгоритма рационального комплектования машинно-тракторных агрегатов для основной обработки почвы. *Механизация и электрификация сельского хозяйства.* 2023;(1):56–62. https://mechel.belal.by/jour/article/viewFile/754/759
28. Лавров А.В., Воронин В.А., Сидоров М.В., Пехальский И.А. Тяговый расчет модульного энерготехнологического средства с учетом кинематического несоответствия привода ведущих осей. *Сельскохозяйственные машины и технологии.* 2022;16(2):30–36. https://doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-2-30-36
29. Moinfar A.M., Shahgholi G., Gilandeh Y.A., Gundoshmian T.M. The Effect of the Tractor Driving System on its Performance and Fuel Consumption. *Energy.* 2020;202:117803. https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117803
30. Kim W.-S., Kim Yo.-J., Park S.-U., Kim Ye.-S. Influence of Soil Moisture Content on the Traction Performance of a 78-kW Agricultural Tractor During Plow Tillage. *Soil and Tillage Research.* 2021;207:104851. https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104851
31. Кравченко В.А., Меликов И.М., Кондра Б.А. Влияние габаритных размеров шин на тягово-сцепные и агротехнические показатели трактора тягового класса 5. *Научный журнал КубГАУ.* 2021;(166):53–67. https://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-166-007
32. Kravchenko V., Kravchenko L., Zhurba V. The Dependence of the Functional Parameters of a Tractor of Traction Class 1,4 as Part of a Cultivator Unit on the Type of Tire Model of Size 18,4r-38 on Propellers. In: XVI International Scientific and Practical Conference "State and Prospects for the Development of Agribusiness – INTERAGROMASH 2023". 2023;413:02044. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202341302044
33. Кравченко В.А., Кравченко Л.В. Аналитическое обоснование параметров внутреннего строения шин движителей мобильных энергетических средств тягового класса 1,4. *Вестник аграрной науки Дона.* 2023;16(1):17–28. https://elibrary.ru/qizbht
34. Кравченко В.А., Кравченко Л.В., Меликов И.М. Эффективность сдваивания колес тракторов тягового класса 5. *Вестник аграрной науки Дона.* 2021;(1):4–12. https://elibrary.ru/vplbuu

35. Ниткин А.А., Коцарь Ю.А., Кочегарова О.С. Повышение эффективности эксплуатации сельскохозяйственных тракторов на сдвоенных шинах. *Аграрный научный журнал.* 2021;(3):78–81. https://doi.org/10.28983/asj.y2021i3pp78-81
36. Melikov I., Kravchenko V., Senkevich S., Hasanova E., Kravchenko L. Traction and Energy Efficiency Tests of Oligomeric Tires for Category 3 Tractors. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. XII International Scientific Conference on Agricultural Machinery Industry (10–13 September 2019). 2019;403:012126. https://doi.org/10.1088/1755-1315/403/1/012126
37. Магомедов Ф.М., Меликов И.М., Яровой В.Г., Кравченко В.А. Пневматическая шина для мобильного энергетического средства. Патент 2677817 Российская Федерация. 21 января 2019. URL: https://i.moscow/patents/ru2677817c1_20190121 (дата обращения: 20.03.2025).
38. Кравченко В.А., Меликов И.М. Влияние бокового увода шин на тягово-энергетические показатели движителя трактора тягового класса 5. *Научный журнал КубГАУ.* 2021:170(6):211–222. URL: https://ej.kubagro.ru/2021/06/pdf/12.pdf (дата обращения: 20.03.2025).
39. Кравченко В.А., Яровой В.Г., Пархоменко С.Г., Меликов И.М. Яровой А.В. Шинный тестер. Патент 2107275 Российская Федерация. 20 марта 1998. URL: https://clck.ru/3NbaeJ (дата обращения: 20.03.2025).

Об авторах:

Кравченко Владимир Алексеевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры техники и технологии пищевых производств Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9152-5851, Scopus ID: 57204159481, SPIN-код: 9983-4293, a3v2017@yandex.ru

Кравченко Людмила Владимировна, доктор технических наук, доцент, заведующая кафедрой проектирования и технического сервиса наземных транспортно-технологических средств Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9228-3313, Researcher ID: ABD-9790-2021, Scopus ID: 57204646125, SPIN-код: 9684-8955, lyudmila.vl.kravchenko@yandex.ru

Журба Виктор Викторович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры проектирования и технического сервиса наземных транспортно-технологических средств Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1075-6157, Scopus ID: 57212377815, SPIN-код: 1453-5517, vic.zhurba@yandex.ru

Вклад авторов:

В. А. Кравченко – контроль, лидерство и наставничество в процессе планирования и проведения исследования; формулирование идеи исследования, целей и задач; разработка и проектирование методологии исследования; осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор данных.

Л. В. Кравченко – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор данных; создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования и полученных данных.

В. В. Журба – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор данных; создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования и полученных данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила в редакцию 21.10.2024; поступила после рецензирования 19.11.2024; принята к публикации 27.11.2024

REFERENCES

1. Ternovykh K.S., Chetverova K.S. State and Trends of Development of the Technical Base of Agricultural Enterprises. *Intentional Agricultural Journal.* 2022;65(6):25. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.55186/25876740_2022_6_6_25
2. Nemtsev A.E., Vakhrushev V.V., Demenok I.V. Renewal of Machine and Tractor Fleet Aic of the Siberian Federal District. *Mechanization and Electrification of Agriculture.* 2022;(55):220–222. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: https://mechel.belal.by/jour/article/view/726 (accessed 20.03.2025).
3. Gojaev T.Z., Zubina V.A., Malakhov I.S. The Justification of Functional Properties of Agricultural Moving Power Units in the Multi-Objective Scenario. *Tractors and Agricultural Machinery.* 2022;89(6):411–420. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.17816/0321-4443-121325
4. Dragulenko V.V., Kharitonov V.V. Rolling Dynamics of a Pneumatic Tire Wheel Under Variable Vertical Load. *Scientific Journal of KubGAU.* 2024;198(4):1–10. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: https://ej.kubagro.ru/2024/04/pdf/08.pdf (accessed 20.03.2025).
5. Khafizov K.A., Khafizov R.N., Tyurin I.Y., Levchenko G.V., Gamayunov D.V., Lushnikov A.A. Optimal Parameters of the Tractor and Arable Unit for Various Optimization Criteria. *Agrarian Scientific Journal.* 2023;(1):155–160. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.28983/asj.y2023i1pp155-160
6. Ovchinnikov A.S., Kuznetsov N.G., Nekhoroshev D.D., Gapich G.S., Nekhoroshev D.A., Fomin S.D., et al. Some Ways to Reduce the Dynamic Loads of Agricultural Machine-Tractor Aggregates. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences.* 2018;13(22):8776–8779. Available at: https://www.arpnjournals.org/jeas/research_papers/rp_2018/jeas_1118_7388.pdf (accessed 20.03.2025).
7. Marshanin E.V., Kuznetsov E.E., Shchitov S.V., Mitrokhina O.P., Kidyaeva N.P., Kovalevsky V.N. Research Directions for Reducing the Resistance Force to the Movement of a Wheeled Power Vehicle. *Agrarian Scientific Journal.* 2023;(7):147–152. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.28983/asj.y2023i7pp147-152
8. Anisimov N.L. The Method of Reasonable Selection of a Pneumatic Tire Set for an Agricultural Tractor. *Tractors and Agricultural Machiner.* 2022;89(6):421–429. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.17816/0321-4443-109895
9. Novikov V.V., Pozdeev A.V., Erontaev V.V., Chumakov D.A., Kolesov N.M., Timoshin N.V., Kagochkin T.A. Experimental Definition of Lateral Stiffness of a Pneumatic Wheel of the MTZ-82 "Belarus" Tractor. *Tractors and Agricultural Machinery.* 2023;90(2):123–132. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.17816/0321-4443-280225
10. Belyaev A.N., Shatsky V.P., Kozlov V.G., Trishina T.V., Vysotskaya I.A. Determination of Theoretical Path of Vehicle Motion upon Cornering. *Journal of Applied Science and Engineering.* 2022;25(5):893–899. https://doi.org/10.6180/jase.202210_25(5).0004
11. Belyaev A.N., Shatsky V.P., Gulevsky V.A., Trishina T.V. Evaluation of the Lateral Deviation of a Wheeled Vehicle from a Given Trajectory. *Siberian Herald of Agricultural Science.* 2022;52(4):120–128. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.26898/0370-8799-2022-4-13
12. Belyaev A.N., Orobinsky V.I., Gulevsky V.A., Trishina T.V., Vysotskaya I.A. Lateral Forces Occuring on the Tractor Wheels at the Beginning of Turning. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University.* 2021;(2):29–38. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.17238/issn2071-2243_2021_2_29
13. Kravchenko V.A., Melikov I.M. Assessing the Skid Resistance of the Propulsive Unit Large Tires in a 5 Traction Class Tractor. *Scientific Journal of KubGAU.* 2021;(169):191–204. (In Russ., abstract in Eng.) https://elibrary.ru/gyfxgd
14. Keller T., Sandin M., Colombi T., Horn R., Or D. Historical Increase in Agricultural Machinery Weights Enhanced Soil Stress Levels and Adversely Affected Soil Functioning. *Soil and Tillage Research.* 2019;194:104293. https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104293

15. Moinfar A., Shahgholi G., Gilandeh Yo.A., Kaveh M., Szymanek M. Investigating the Effect of the Tractor Driving System Type on Soil Compaction Using Different Methods of ANN, ANFIS and Step Wise Regression. *Soil and Tillage Research.* 2022;222:105444. https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105444
16. Mileusnić Z.I., Satjnikov E., Radojević R.L., Petrović D.V. Soil Compaction Due to Agricultural Machinery Impact. *Journal of Terramechanics.* 2022;100:51–60. https://doi.org/10.1016/j.jterra.2021.12.002
17. Moinfar A., Shahgholi G., Abbaspour-Gilandeh Yo., Herrera-Miranda I., Hernández-Hernández J.L., Herrera-Miranda M.A. Investigating the Effect of the Tractor Drive System Type on Soil Behavior Under Tractor Tires. *Agronomy.* 2021;11(4):696. https://doi.org/10.3390/agronomy11040696
18. Kravchenko V., Kravchenko L., Zhurba V., Senkevich S., Duryagina V. Reducing the Dynamic Loading of the Links of the Machine-Tractor Unit Aggregated by the Mobile Power Vehicle of the 1.4 Drawbar Category. In: Networked Control Systems for Connected and Automated Vehicles (16 November 2022). p. 2043–2052. https://doi.org/10.1007/978-3-031-11051-1_210
19. Kravchenko V.A. The Results of Machine-Tractor Unit's Tests on the Basis of a 1,4 Tractor Having a Rotary Mass of the Engine. *Scientific Journal of KubGAU.* 2014;(99). (In Russ., abstract in Eng.) Available at: https://ej.kubagro.ru/2014/05/pdf/15.pdf (accessed 20.03.2025).
20. Nekhoroshev D.D., Nekhoroshev D.A., Konovalov P.V., Popov A.Yu. Research on Experimental Machine-Tractor Aggregates Equipped with Pneumatic Hydraulic Planetary Clutch at Roag Works. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Mathematical Modeling of Technical and Economic Systems in Agriculture III-2020 (10–11 December 2020). https://doi.org/10.1088/1755-1315/786/1/012016
21. Senkevich S., Bolshev V., Ilchenko E., Chakrabarti P., Jasiński M., Leonowicz Z., et al. Elastic Damping Mechanism Optimization by Indefinite Lagrange Multipliers. *IEEE Access.* 2021;9:71784–71804. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3078609
22. Senkevich S., Kravchenko V., Lavrukhin P., Ivanov P., Senkevich A. Theoretical Study of the Effect of an Elastic-Damping Mechanism in the Tractor Transmission on a Machine-Tractor Unit Performance While Sowing. In: Handbook of Research on Smart Computing for Renewable Energy and Agro-Engineering. IGI Global Scientific Publishing, 2020. p. 423–463. https://doi.org/10.4018/978-1-7998-1216-6.ch017
23. Kravchenko V., Kravchenko L. In the Transmission of the 1,4 Drawbar Category Mobile Power Vehicle on the Performance Indicators of Machine and Tractor Units. In: XV International Scientific Conference on Precision Agriculture and Agricultural Machinery Industry "State and Prospects for the Development of Agribusiness – INTERAGROMASH 2022". 2022;363:03022. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202236303022
24. Kuznetsov N.G., Shatokhin A.A., Nekhoroshev D.D., Fomin S.D., Nekhoroshev D.A. Mathematical Model Studying the Operation of a Machine-Tractor Unit with a Tractor "DT-175S" Wit an Elastic Element in the Linkage System. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference on Engineering Studies and Cooperation in Global Agricultural Production (27–28 August 2020). 2021;659:012076. https://doi.org/10.1088/1755-1315/659/1/012076
25. Belyaev A.N., Afonichev D.N., Trishina T.V., Novikov A.E., Sheredekin P.V., Vysotskaya I.A. The Influence of the Rigidity of the Hinged System on the Stability of the Curved Movement of the Machinetractor Unit. *Science in the Central Russia.* 2023;(2):115–126. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.35887/2305-2538-2023-2-115-126
26. Iovlev G.A., Goldina I.I. Dependence of Tractor Traction Properties on Agricultural Machinery Connections. *Agricultural Machinery and Technologies.* 2023;17(4):75–81. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-4-75-81
27. Lenski A.V., Zheshko A.A. Development of an Algorithm for Rational Acquisition of Machine-Tractor Units for Basic Tillage. *Mechanization and Electrification of Agriculture.* 2023;(1):56–62. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: https://mechel.belal.by/jour/article/viewFile/754/759 (accessed 20.03.2025).

28. Lavrov A.V., Voronin V.A., Sidorov M.V., Pekhalskiy I.A. Traction Calculation for Modular Energotechnological Unit Given Kinematic Mismatch of Driving Axles. *Agricultural Machinery and Technologies.* 2022;16(2):30–36. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-2-30-36
29. Moinfar A.M., Shahgholi G., Gilandeh Y.A., Gundoshmian T.M. The Effect of the Tractor Driving System on its Performance and Fuel Consumption. *Energy.* 2020;202:117803. https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117803
30. Kim W.-S., Kim Yo.-J., Park S.-U., Kim Ye.-S. Influence of Soil Moisture Content on the Traction Performance of a 78-kW Agricultural Tractor During Plow Tillage. *Soil and Tillage Research.* 2021;207:104851. https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104851
31. Kravchenko V.A., Melikov I.M., Kondra B.A. The Impact of the Tires of Overall Sizes on the Traction-Coupling and Agrotechnical Parameters in the Tractor of Class 5 Traction. *Scientific Journal of KubGAU.* 2021;(166):53–67. (In Russ., abstract in Eng.) https://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-166-007
32. Kravchenko V., Kravchenko L., Zhurba V. The Dependence of the Functional Parameters of a Tractor of Traction Class 1,4 as Part of a Cultivator Unit on the Type of Tire Model of Size 18,4r-38 on Propellers. In: XVI International Scientific and Practical Conference "State and Prospects for the Development of Agribusiness – INTERAGROMASH 2023". 2023;413:02044. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202341302044
33. Kravchenko V.A., Kravchenko L.V. Analytical Justification of the Parameters of the Internal Structure of Tires of a Propulsion Unit for Mobile Power Vehicles of Traction Class 1,4. *Vestnik Agrarnoj Nauki Dona.* 2023;16(1):17–28. (In Russ., abstract in Eng.) https://elibrary.ru/qizbht
34. Kravchenko V.A., Kravchenko L.V., Melikov I.M. The Efficiency of the Wheel Doubling in the Tractor of Traction Class 5. *Vestnik Agrarnoj Nauki Dona.* 2021;(1):4–12. (In Russ., abstract in Eng.) https://elibrary.ru/vplbuu
35. Nitkin A.A., Kotsar Yu.A., Kochegarova O.S. Increasing Efficiency of Operation of Agricultural Tractors with Double Tires. *The Agrarian Scientific Journal.* 2021;(3):78–81. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.28983/asj.y2021i3pp78-81
36. Melikov I., Kravchenko V., Senkevich S., Hasanova E., Kravchenko L. Traction and Energy Efficiency Tests of Oligomeric Tires for Category 3 Tractors. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. XII International Scientific Conference on Agricultural Machinery Industry (10–13 September 2019). 2019;403:012126. https://doi.org/10.1088/1755-1315/403/1/012126
37. Magomedov F.M., Melikov I.M., Yarovoy V.G., Kravchenko V.A. [Pneumatic Tire for Mobile Power Equipment]. Patent 2677817 Russian Federation. 2019 January 21. (In Russ.) Available at: https://i.moscow/patents/ru2677817c1_20190121 (accessed 20.03.2025).
38. Kravchenko V.A., Melikov I.M. Effect of the Tire Lateral Skid on Traction and Energy Performance of the Propulsion Unit in the Tractor of Class 5 Traction. *Scientific Journal of KubGAU.* 2021:170(6):211–222. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: https://ej.kubagro.ru/2021/06/pdf/12.pdf (accessed 20.03.2025).
39. Kravchenko V.A., Jarovoj V.G., Parkhomenko S.G., Melikov I.M., Jarovoj A.V Tire Tester. Patent 2107275 Russian Federation. 1998 March 20. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: https://clck.ru/3NbaeJ (accessed 20.03.2025).

About the authors:

Vladimir A. Kravchenko, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Food Production Engineering and Technology, Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344003, Russian Federation), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9152-5851, Scopus ID: 57204159481, SPIN-code: 9983-4293, a3v2017@yandex.ru

Lyudmila V. Kravchenko, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Design and Technical Service of Ground Transport and Technological Means, Don State Technical University

(1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344003, Russian Federation), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9228-3313, Researcher ID: ABD-9790-2021, Scopus ID: 57204646125, SPIN-code: 9684-8955, lyudmila.vl.kravchenko@yandex.ru

Victor V. Jurba, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Design and Technical Service of Ground Transport and Technological Means, Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344003, Russian Federation), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1075-6157, Scopus ID: 57212377815, SPIN-code: 1453-5517, vic.zhurba@yandex.ru

Authors contribution:

V. A. Kravchenko – supervision, leadership and mentoring in the planning and conducting of the study; formulating ideas, goals and aims of the study; developing and designing the study methodology; conducting a study and investigating process, specifically performing the experiments and data/evidence collection.

L. V. Kravchenko – conducting the study, specifically performing the experiments and data/evidence collection; preparing and presenting the manuscript: visualizing the study results and obtained data.

V. V. Jurba – conducting the study, performing the experiments and data/evidence collection; preparing and presenting the manuscript: visualizing the study results and obtained data.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 21.10.2024; revised 19.11.2024; accepted 27.11.2024

https://vestnik.mrsu.ru ISSN 2658-4123, eISSN 2658-6525

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ / TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT

https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202503.393-413
EDN: https://elibrary.ru/ojtypk
УДК 636.085.5
Оригинальная статья / Original article

Рациональные значения параметров процесса влажного гранулирования корма для рыб в корзинном грануляторе

С. В. Брагинец[1,2], **В. И. Пахомов**[1,2], **О. Н. Бахчевников**[1]✉, **А. С. Алферов**[1], **К. А. Деев**[1]
[1] *Аграрный научный центр «Донской», г. Зерноград, Российская Федерация*
[2] *Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация*
✉ *oleg-b@list.ru*

Аннотация

Введение. Для влажного гранулирования растительного сырья и получения гранул корма малого диаметра (0,5–2 мм) для рыб и их мальков может быть использован корзинный гранулятор, не используемый ранее для приготовления кормов в аквакультуре. Процесс работы корзинного гранулятора недостаточно изучен, а его рациональные параметры еще не получили должного научного обоснования.

Цель исследования. Повышение водостойкости гранул корма для рыб путем определения рациональных параметров процесса влажного гранулирования растительного сырья в корзинном грануляторе.

Материалы и методы. В корзинном грануляторе гранулировали рассыпной комбикорм для мальков карпа, приготовленный из растительного сырья, получая гранулы диаметром 2 мм. Критерием оптимизации процесса влажного гранулирования служило время полного распада гранул корма в воде. В ходе опытов варьировали значения четырех факторов: влажность, температура сырья, модуль помола сырья, частота вращения рабочих органов гранулятора. Обработав результаты экспериментов, получили уравнение регрессии и построили поверхности отклика и их двумерные сечения, по которым выполнили анализ.

Результаты исследования. Установили, что увеличение значений всех факторов до определенного предела повышает устойчивость гранул корма к действию воды. Влияние температуры сырья на время распада гранул корма менее существенно, чем трех остальных факторов. Оптимальная величина времени распада гранул корма в воде, равная 92–96 мин, достигается при следующих рациональных диапазонах факторов процесса влажного гранулирования: влажность сырья 40...42 %; модуль помола сырья 1,4...1,8 мм (средний помол); частота вращения рабочих органов корзинного гранулятора 47...51 мин$^{-1}$; температура сырья 42...56 °С.

Обсуждение и заключение. Установлены рациональные значения факторов процесса влажного гранулирования растительного сырья в корзинном грануляторе, позволяющие производить гранулированный корм для рыб и их мальков, соответствующий

© Брагинец С. В., Пахомов В. И., Бахчевников О. Н., Алферов А. С., Деев К. А., 2025

Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

зоотехническим требованиям по водостойкости. Установленные для процесса влажного гранулирования в корзинном грануляторе зависимости изменения водостойкости гранул от влажности и температуры сырья, модуля его помола и частоты вращения рабочих органов соответствуют аналогичным зависимостям, ранее установленным для процесса сухого гранулирования в пресс-грануляторах с вертикальной кольцевой матрицей.

Ключевые слова: корм для рыб, влажное гранулирование, гранулы, растительное сырье, влажное сырье, корзинный гранулятор, время распада гранул

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Брагинец С.В., Пахомов В.И., Бахчевников О.Н., Алферов А.С., Деев К.А. Рациональные значения параметров процесса влажного гранулирования корма для рыб в корзинном грануляторе. *Инженерные технологии и системы.* 2025;35(3):393–413. https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202503.393-413

Rational Values of Fish Feed Wet Pelleting Process in the Basket Pelleter

S. V. Braginets[a,b], **V. I. Pakhomov**[a,b], **O. N. Bakhchevnikov**[a] ✉, **A. S. Alferov**[a], **K. A. Deev**[a]
[a] *Agricultural Research Center* "*Donskoy*", *Zernograd*, *Russian Federation*
[b] *Don State Technical University*, *Rostov-on-Don*, *Russian Federation*
✉ *oleg-b@list.ru*

Abstract

Introduction. The basket pelleter can be used for wet pelleting of plant raw material and producing of small diameter (0.5–2 mm) feed pellets for fish and fish fry. Basket pelleters have not previously been used in aquaculture for preparing feed. The operation process of basket pelleters has not been sufficiently studied and its rational parameters have not the sufficient scientific basis.

Aim of the Study. The study is aimed at increasing of water resistance of fish feed pellets by determining the rational parameters of the process of wet pelleting of plant raw materials in the basket pelleter.

Materials and Methods. In the basket pelleter, there was pelleted crumbled feed from plant raw material for carp fry. The diameter of pellets was 2 mm. The time of complete disintegration of the feed pellets in water was a criterion for optimizing the wet pelleting process. The values of four parameters were varied during the experiments: raw material moisture, raw material temperature, raw material fineness modulus, and rotation speed of the pelleter movable operating devices. After processing the experimental results, there was obtained the regression equation and there were drawn response surfaces and their two-dimensional sections. The analysis of response surfaces was performed.

Results. It has been found that increasing in the values of all factors up to a definite limit increases the water resistance of feed pellets. The effect of raw material temperature on the disintegration time of pellets is less significant than the other three parameters. The optimum value of the disintegration time of pellets in water, equal to 92–96 min, is achieved at the rational ranges of parameters of feed wet pelleting process: raw material moisture 40...42%; fineness modulus of raw material 1,4...1,8 mm (middle grinding); rotation frequency of movable operating elements of basket pelleter 47...51 min^{-1}; raw material temperature 42...56°C.

Discussion and Conclusions. There have been found rational parameters of the process of wet pelleting of plant raw materials in a basket pelleter that make it possible to produce pelleted feed for fish and fish fry meeting zootechnical requirements for water resistance.

For the process of wet pelleting in the basket pelleter, there have been found the dependences of changing water resistance of pellets on raw material moisture and temperature, and its grinding modulus and rotation speed of movable operating elements. They correspond to similar dependences, which were previously found for the process of dry pelleting in pellet-presses with a vertical ring die.

Keywords: fish feed, wet pelleting, pellets, plant raw material, wet raw material, basket pelleter, pellet disintegration time

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

For citation: Braginets S.V., Pakhomov V.I., Bakhchevnikov O.N., Alferov A.S., Deev K.A. Rational Values of Fish Feed Wet Pelleting Process in the Basket Pelleter. *Engineering Technologies and Systems.* 2025;35(3):393–413. https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202503.393-413

ВВЕДЕНИЕ

В Российской Федерации в настоящее время существует потребность в увеличении производства гранулированных кормов для прудовых рыб семейства карповых и их мальков[1]. Основным сырьем для производства этих кормов служат зерно пшеницы и ячменя, шроты и другие виды растительного сырья [1; 2]. Для производства гранулированных комбикормов для пресноводных рыб подходит влажное гранулирование, обеспечивающее лучшее связывание частиц сырья и получение более прочных и водостойких гранул [3]. Гранулы корма для рыб должны длительное время не распадаться в воде [4], чего можно добиться только в результате влажного гранулирования [5]. Связывание частиц сырья в гранулах при сухом гранулировании можно улучшить с помощью добавления связующих веществ, но это усложняет и удорожает процесс производства кормов.

На комбикормовых заводах для приготовления комбикормов способами сухого и влажного гранулирования применяют одно и то же оборудование – пресс-гранулятор с вертикальной кольцевой матрицей [6; 7]. Но его недостатком является сложность получения гранул малого диаметра (менее 2 мм) с приемлемой энергоемкостью, вследствие чего отечественная промышленность почти не производит гранулированные комбикорма для мальков пресноводных рыб диаметром 0,5–2 мм [8], хотя в них имеется значительная потребность.

Для влажного гранулирования растительного сырья влажностью 25…40 % и производства гранул корма небольшого диаметра (0,5…2 мм) для мальков рыб может быть использовано сравнительно новое техническое средство – корзинный гранулятор, называемый также корзинным экструдером (*basket granulator or basket extruder*) [9; 10]. Особенность его конструкции состоит в том, что в неподвижной цилиндрической перфорированной корзине, являющейся аналогом вертикальной кольцевой матрицы, по принципу «вал в валу» расположены рассекатели (ножи), а под ними – экструзионные лопасти, вращающиеся в противоположном направлении [11]. Рассекатели измельчают и перемешивают влажное сырье, а экструзионные лопасти уплотняют его и продавливают через фильеры цилиндрической корзины, в результате чего формируются гранулы.

[1] Анализ рынка продукции аквакультуры и кормов // Комбикорма. 2024. № 2. С. 32–33. URL: https://clck.ru/3NegEy (дата обращения: 21.09.2024).

Грануляторы корзинного типа получают все большее распространение в фармацевтической промышленности [12; 13], но для приготовления кормов в аквакультуре их ранее не применяли. При этом процесс их работы еще недостаточно изучен, а его рациональные параметры еще не получили должного научного обоснования. Можно предположить, что функциональные зависимости между различными параметрами процесса влажного гранулирования в корзинном грануляторе и водостойкостью гранул должны быть аналогичны ранее установленным закономерностям гранулирования в пресс-грануляторе с кольцевой матрицей, но это необходимо подтвердить экспериментально.

Вышеизложенное обусловило необходимость выполнения экспериментальных исследований процесса влажного гранулирования растительного сырья, в том числе зернового, в корзинном грануляторе.

Целью исследования стало повышение водостойкости гранул корма для рыб путем определения рациональных параметров процесса влажного гранулирования растительного сырья в корзинном грануляторе.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Имеется небольшое количество научных публикаций, посвященных исследованию процесса гранулирования влажных материалов в корзинном грануляторе (экструдере), что можно объяснить малой распространенностью этой машины.

Корзинный гранулятор (экструдер) был создан в конце 80-х – начале 90-х гг. XX в. Вначале он использовался как лабораторное оборудование в фармацевтической промышленности. К тому же времени относятся первые научные исследования по этой тематике.

К. Вервает и другие [9] установили, что измерение мощности, потребляемой электродвигателем корзинного экструдера, является подходящим методом для мониторинга процесса экструзии (гранулирования) влажного сырья. Проведенное им сравнение качества гранул, полученных после экструзии с использованием корзин (матриц) с различным соотношением длины и радиуса фильер L/R, показало, что корзины с более высоким отношением L/R обеспечивают лучшее качество гранул.

Л. Баерт [14] сравнил два метода исследования процесса гранулирования влажного сырья в корзинном грануляторе: измерение давления гранулирования в фильерах матрицы и определение потребляемой мощности электродвигателя гранулятора. Он пришел к выводу, что их результаты идентичны, и обе системы одинаково полезны для мониторинга и изучения процесса экструзии в корзинном грануляторе (экструдере). Но измерение потребляемой мощности является более простым и менее дорогостоящим способом контроля и изучения процесса гранулирования.

После этого последовал длительный перерыв в изучении процессов в корзинном грануляторе. С 2015 г. корзинные экструдеры начали активно разрабатывать и производить в Китае для фармацевтической промышленности. Это вызвало новый интерес к их изучению.

М. Чжан [15] исследовал процесс гранулирования микроцеллюлозы влажностью 45 % в корзинном экструдере с диаметром фильер матрицы 1 и 2 мм.

Была установлена математическая зависимость между временем образования гранулы и скоростью вращения прессующего рабочего органа корзинного гранулятора.

С. Р. Жуковский [10] сравнил производительность грануляции влажного сырья при использовании корзинного и купольного (*dome*) гранулятора. Он пришел к выводу, что корзинный гранулятор наилучшим образом подходит для гранулирования влажного сырья в гранулы диаметром 0,5–1,5 мм в фармацевтической промышленности.

В Российской Федерации с 2022 г. разработка и исследования корзинного гранулятора ведутся в Аграрном научном центре «Донской» [16], причем впервые исследуется процесс приготовления в нем гранулированного корма для рыб из растительного сырья [17].

В новейшем исследовании Р. Фекете [11] изучено влияние конструкции лопастей корзинного гранулятора на процесс экструзии влажного сырья. Ученый установил, что изменяя геометрию лопастей, можно изменять давление гранулирования, благодаря чему возможно добиться получения гранул со стабильными характеристиками и минимизировать вариабельность параметров процесса.

Также представляют интерес результаты исследования А. В. Куликова [8], который изучил процесс получения микрогранул рыбных комбикормов на лабораторном стенде. Им были установлены зависимости давления гранулирования, производительности процесса, предела прочности гранул от температуры и влажности сырья при разных диаметрах фильер матрицы (0,7–1,5 мм). Недостатком этой работы является то, что сырье продавливали через фильеры плоской матрицы посредством пресса, в результате чего характеристики процесса могут заметно отличаться от закономерностей реального процесса формирования гранул в фильерах кольцевой матрицы под действием вращающихся лопастей гранулятора.

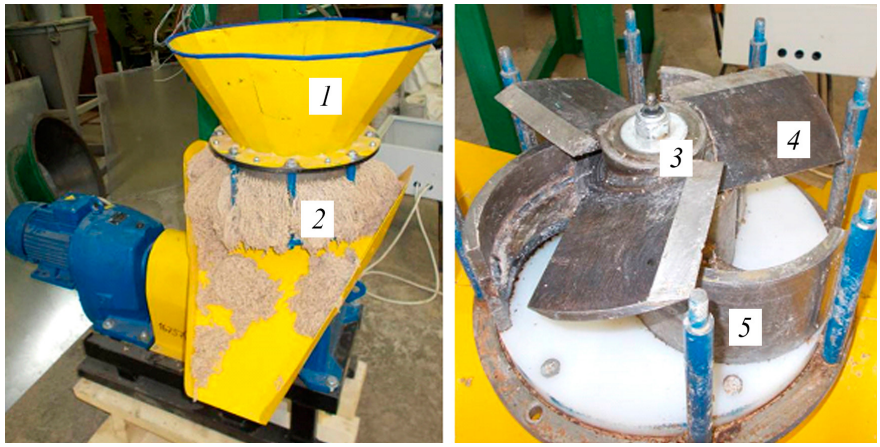
Таким образом, процесс гранулирования влажного растительного сырья в гранулы диаметром 0,5–2 мм в корзинном грануляторе недостаточно изучен, а его основные закономерности не установлены экспериментально, что препятствует широкому использованию таких грануляторов в комбикормовой промышленности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объекты исследования

Эксперименты выполняли на корзинном грануляторе, разработанном и изготовленном в Аграрном научном центре «Донской» [16], внешний вид которого показан на рисунке 1.

Параметры конструктивных элементов корзинного гранулятора: диаметр цилиндрической корзины – 400 мм, длина цилиндрического канала фильеры – 2 мм, диаметр канала фильеры – 2 мм, отношение длины канала фильеры к его диаметру $L/D = 1$, доля площади активной зоны корзины (матрицы) гранулятора в ее общей площади – 38 %.



Р и с. 1. Корзинный гранулятор конструкции
Аграрного научного центра «Донской» и его рабочие органы:
1 – загрузочный бункер; *2* – перфорированная корзина; *3* – приводной вал;
4 – рассекатели (ножи); *5* – экструзионные лопасти (адаптировано из [17])

F i g. 1. Basket pelleter and its movable operating elements
designed by Agricultural Research Centre Donskoy:
1 – feed hopper; *2* – perforated basket; *3* – drive shaft; *4* – splitters (knives);
5 – extrusion blades (adapted from [17])

Источник: фотографии сделаны К. А. Деевым в ходе испытаний корзинного гранулятора (18.09.2022 г.).
Source: photos are taken by K. A. Deev during testing of the basket pelleter on 18 September 2022.

Процедура исследования

Растительное сырье для приготовления корма предварительно измельчали в молотковой дробилке с диаметром отверстий решета 2, 3 и 4 мм, получая измельченное сырье с модулем помола 0,82, 1,24 и 1,66 мм.

Гранулировали приготовленный в горизонтальном смесителе рассыпной комбикорм для мальков карпа (*Cyprinus Carpio L.*), по содержанию питательных веществ [18], в том числе жиров (9 %), соответствующий требованиям ГОСТ 10385-2014[2]. Комбикорм имеет в своем составе зерно пшеницы ранней восковой спелости (60 %), сою (30 %), белково-витаминные минеральные концентраты (10 %).

Рассыпной комбикорм перед гранулированием увлажняли в смесителе, добавляя в него нагретую до 20, 45 и 70 °С воду, перемешивая его до достижения соответствующей температуры и влажности 30, 35 и 40 %. Увлажненный корм перед гранулированием выдерживали в течение 20 мин, чтобы обеспечить проникновение воды внутрь его частиц. В результате происходит желатинизации крахмала, что увеличивает вязкость сырья, необходимую для повышения прочности и водостойкости гранул [19; 20].

Частоту вращения экструзионных лопастей корзинного гранулятора изменяли с помощью трехфазного частотного преобразователя. Была задана частота вращения

[2] ГОСТ 10385-2014. Комбикорма для рыб. Общие технические условия. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200113022 (дата обращения: 20.03.2025).

рабочих органов гранулятора величиной 40, 50 и 60 мин$^{-1}$. Производительность гранулятора при этом составила 231, 274 и 291 кг/ч соответственно.

Методы исследования

Исследовали процесс продавливания сырья экструзионными лопастями корзинного гранулятора через фильеры корзины, в результате чего происходило формирование гранул корма диаметром 2 мм. Полученные гранулы подвергали сушке в калориферной сушилке до достижения влажности 13,5 %, затем охлаждали до температуры 20 °С. После этого высушенные гранулы массой 10 г помещали в стеклянную емкость, в нижней части которой была расположена проволочная сетка с размером ячейки 0,5 мм. Гранулы заливали водой температурой 20 °С в объеме 2/3 от общего объема емкости и помещали в термостат, где поддерживали постоянную температуру, контролируя ее при помощи контактного термометра. Измеряли время, за которое гранулы в воде полностью распадаются на мелкие частицы, образуя однородную суспензию, то есть продолжительность полного распада гранул в воде. Процесс распада фиксировали визуально, измеряя время секундомером. Процесс распада гранул корма в воде считали законченным тогда, когда все их частицы, отделившиеся от общей массы, проходили через сетку.

Пробы сырья и корма для анализа отбирали согласно ГОСТ Р ИСО 6497-2011[3]. Влажность рассыпного корма и готовых гранул определяли по ГОСТ Р 54951-2012[4]. Модуль помола сырья определяли по ГОСТ 8770-58[5] и ГОСТ 13496.8-72[6].

Критерии оптимизации

В качестве критерия оптимизации процесса влажного гранулирования растительного сырья y было принято время распада гранул корма для мальков рыб в воде, мин. Целью оптимизации являлось максимально возможное увеличение значения этого критерия.

Из большого числа различных факторов, влияющих на процесс влажного гранулирования растительного сырья и качество получаемых гранул в ходе предварительных исследований выделили четыре наиболее значимых: x_1 – влажность сырья, %; x_2 – температура сырья, °С; x_3 – модуль помола сырья, мм; x_4 – частота вращения рабочих органов корзинного гранулятора, мин$^{-1}$.

Планирование эксперимента

Общий характер протекания процесса влажного гранулирования при варьировании факторов был определен предварительными поисковыми экспериментами, в результате которых установлено, что в области, близкой к экстремуму, математическая модель отклика не является линейной, поэтому для ее адекватного описания необходимо использовать нелинейные полиномы второго порядка.

Для планирования эксперимента и создания математической модели процесса влажного гранулирования был использован некомпозиционный трехуровневый

[3] ГОСТ Р ИСО 6497-2011. Корма для животных. Отбор проб [Электронный ресурс]. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200088849 (дата обращения: 20.03.2025).

[4] ГОСТ Р 54951-2012. Корма для животных. Определение содержания влаги [Электронный ресурс]. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200095041 (дата обращения: 20.03.2025).

[5] ГОСТ 8770-58. Комбикорм. Методы определения качества [Электронный ресурс]. URL: https://www.normacs.ru/Doclist/doc/39A9.html (дата обращения: 20.03.2025).

[6] ГОСТ 13496.8-72. Комбикорма. Методы определения крупности размола и содержания неразмолотых семян культурных и дикорастущих растений [Электронный ресурс]. URL: https://meganorm.ru/Data2/1/4294837/4294837758.pdf (дата обращения: 20.03.2025).

план Бокса-Бенкена второго порядка для четырех факторов [21; 22]. На основе предварительных поисковых экспериментов были выбраны уровни варьирования факторов, соответствующие стационарной области функции отклика (табл.).

Таблица
Table

Факторы и уровни их варьирования
Factors and their variation levels

№	Наименование фактора / Factor name	Уровень фактора / Factor level		
		–1	0	+1
1	Влажность сырья, % / Raw material moisture, %	30	35	40
2	Температура сырья, °С / Raw material temperature, °С	20	45	70
3	Модуль помола сырья, мм / Raw material grinding modulus, mm	0,82	1,24	1,66
4	Частота вращения рабочих органов гранулятора, мин$^{-1}$ / Rotation speed of pelleter movable operating elements, min^{-1}	40	50	60

Опыты в рамках многофакторного эксперимента были выполнены в трехкратной повторности. Значимость коэффициентов уравнения регрессии определили по критерию Стьюдента. Для проверки адекватности полученного уравнения регрессии использовали критерий Фишера[7]. Статистическую обработку результатов эксперимента выполнили в программе Statistica 12.0.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты статистической обработки

В процессе статистической обработки результатов экспериментов было получено уравнение регрессии в закодированном виде, описывающее процесс влажного гранулирования при варьировании факторов, и определен множественный коэффициент корреляции:

$$y = 36,09 - 3,01x_1 - 2,75x_2 - 2,81x_3 - 1,48x_4 + 5,45x_1x_2 + 2,03x_1x_3 + 0,28x_1x_4 - \\ - 0,12x_2x_3 + 0,52x_2x_4 + 0,12x_3x_4 + 9,85x_1^2 - 2,56x_2^2 - 2,82x_3^2 - 0,6x_4^2. \quad (1)$$

Множественный коэффициент корреляции $R = 0,9538$.

Таким образом, была построена математическая модель процесса влажного гранулирования растительного сырья, позволяющая рассчитать значения коэффициентов регрессии при принятых уровнях варьирования факторов.

Значение критерия Фишера для уравнения регрессии времени распада гранул составило 2,51, что меньше табличного значения этого критерия, равного 2,66. Следовательно, регрессионная модель адекватно описывает процесс влажного гранулирования.

При переходе от кодированных значений факторов к натуральным получили математическую зависимость критерия оптимизации от варьируемых факторов с учетом значимости коэффициентов по критерию Стьюдента:

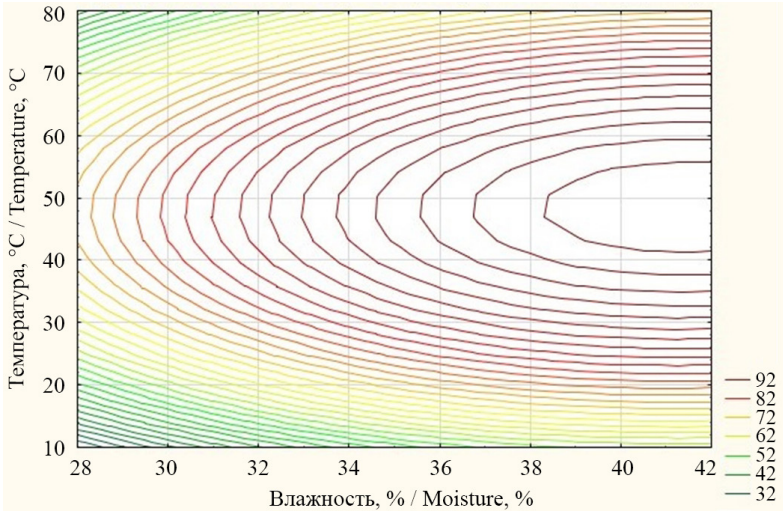
[7] Antony J. Design of Experiments for Engineers and Scientists. Amsterdam : Elsevier, 2023. 275 p. URL: https://clck.ru/3NegUw (дата обращения: 23.10.2024).

$$y = 108,35 - 10,43x_1 - 8,23x_2 - 11,09x_3 - 4,99x_4 + 2,88x_1x_2 + 0,88x_1x_3 + \\ + 2,34x_1x_4 - 0,96x_2x_3 + 1,90x_2x_4 + 1,39x_3x_4 + 2,05x_1^2 - \\ - 1,26x_2^2 - 1,22x_3^2 - 1,89x_4^2 \quad (2)$$

Графические зависимости

Для определения рациональных значений варьируемых факторов были построены поверхности отклика согласно уравнению (2). Для этого исходное уравнение регрессии путем канонического преобразования свели к уравнениям с двумя факторами, оставив остальные факторы на постоянных уровнях. Согласно полученным уравнениям были построены двумерные сечения поверхности отклика.

На рисунке 2 показано двумерное сечение поверхности отклика, характеризующее зависимость времени распада гранул корма от температуры и влажности сырья. Из графика на рисунке 2 видно, что влажность сырья существенно влияет на водостойкость гранул, в то время как влияние температуры сырья менее существенно. График показывает, что повышение влажности сырья до 42 % и его температуры до 56 °С приводит к увеличению времени распада гранул в воде. Наилучший результат, при котором время распада гранул составляет 92 мин, достигается при влажности сырья 38–42 % и температуре 41–56 °С. При увеличении значений факторов выше этого диапазона происходит снижение времени распада гранул.



Р и с. 2. Влияние влажности и температуры сырья на время распада гранул корма

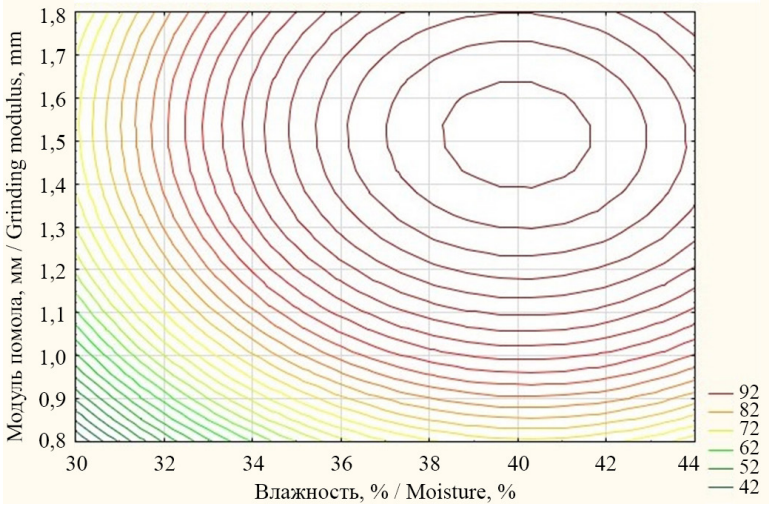
F i g. 2. Effect of raw material moisture and temperature on the disintegration time of feed pellets

Источник: графики для рисунков 2–7 построены авторами с помощью программы Statistica 12.0.

Source: graphs 2–7 are created by the authors using the Statistica 12.0 software.

На рисунке 3 показано двумерное сечение поверхности отклика, характеризующее зависимость времени распада гранул корма от модуля помола сырья и его влажности. Из графика на рисунке 3 следует, что наилучший результат процесса

гранулирования, при котором время распада гранул корма составляет 92 мин, достигается при влажности сырья 38,2–41,6 % и модуле помола 1,39–1,64 мм. Время распада гранул увеличивается при повышении значений факторов до 41,6 % и 1,64 мм, после чего уменьшается. Результаты эксперимента показывают, что величина модуля помола сырья играет существенную роль в получении водостойких гранул корма.

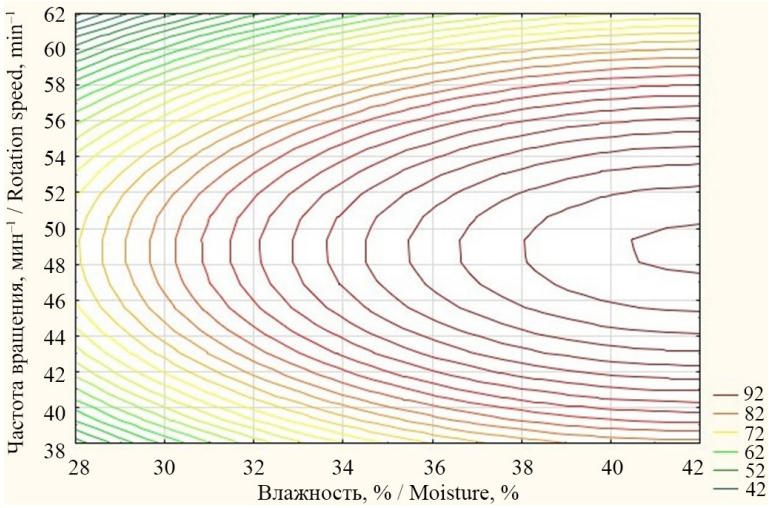


Р и с. 3. Влияние влажности сырья и его модуля помола на время распада гранул корма

F i g. 3. Influence of raw material moisture and its grinding modulus on the disintegration time of feed pellets

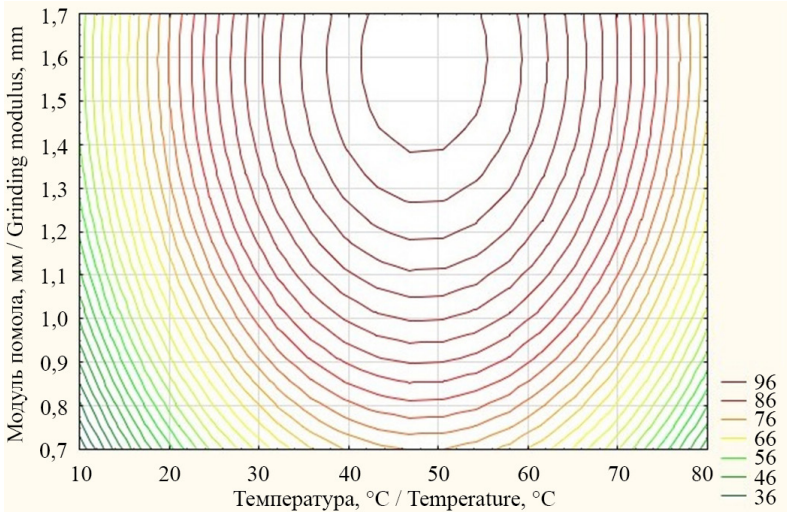
На рисунке 4 показано двумерное сечение поверхности отклика, характеризующее зависимость устойчивости гранул корма в водной среде от влажности сырья и частоты вращения рабочих органов корзинного гранулятора. Из графика на рисунке 4 видно, что наилучший результат процесса, при котором время распада гранул составляет 92 мин, достигается при влажности сырья 40,4–42 % и частоте вращения рабочих органов корзинного гранулятора 47,5–50,2 мин$^{-1}$. При повышении влажности сырья до 42 % и частоты вращения рабочих органов до 50,2 мин$^{-1}$ происходит увеличение времени распада гранул, которое при дальнейшем увеличении их значений сменяется снижением водостойкости гранул корма.

На рисунке 5 показано двумерное сечение поверхности отклика, характеризующее зависимость времени распада гранул корма в воде от температуры сырья и модуля его помола. Из графика на рисунке 5 видно, что наилучший результат процесса, при котором время распада гранул составляет 96 мин, достигается при температуре сырья от 41,8 до 54,6 °С и модуле помола 1,39–1,8 мм. При увеличении температуры сырья до величины 54,6 °С и модуля помола до 1,8 мм происходит повышение времени распада гранул, которое при дальнейшем увеличении их значений сменяется снижением водостойкости гранул корма.



Р и с. 4. Влияние влажности сырья и частоты вращения рабочих органов корзинного гранулятора на время распада гранул корма

F i g. 4. Influence of raw material moisture and rotation speed of movable operating elements of a basket pelleter on the disintegration time of feed pellets

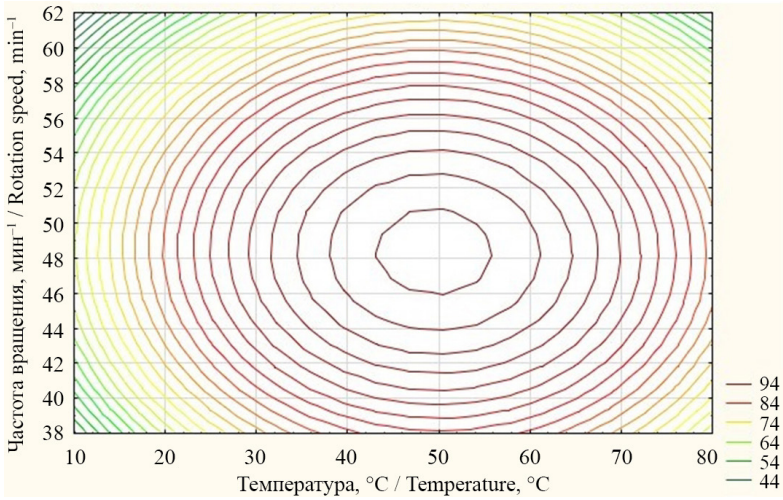


Р и с. 5. Влияние температуры сырья и модуля его помола на время распада гранул корма

F i g. 5. Effect of raw material temperature and grinding modulus on disintegration time of feed pellets

На рисунке 6 показано двумерное сечение поверхности отклика, характеризующее зависимость времени распада гранул корма в воде от температуры сырья и частоты вращения рабочих органов корзинного гранулятора. Из графика на рисунке 6 следует, что наилучший результат гранулирования, при котором время распада гранул составляет 94 мин, достигается при температуре сырья от 43,1 до 55,8 °C и частоте вращения рабочих органов от 46 до 51 мин$^{-1}$. При повышении температуры сырья до 55,8 °C и увеличении частоты вращения рабочих органов

гранулятора до 51 мин$^{-1}$ происходит повышение длительности периода распада гранул в воде, которое при дальнейшем увеличении значений этих факторов сменяется уменьшением водостойкости гранул корма.



Р и с. 6. Влияние температуры сырья и частоты вращения рабочих органов корзинного гранулятора на время распада гранул корма

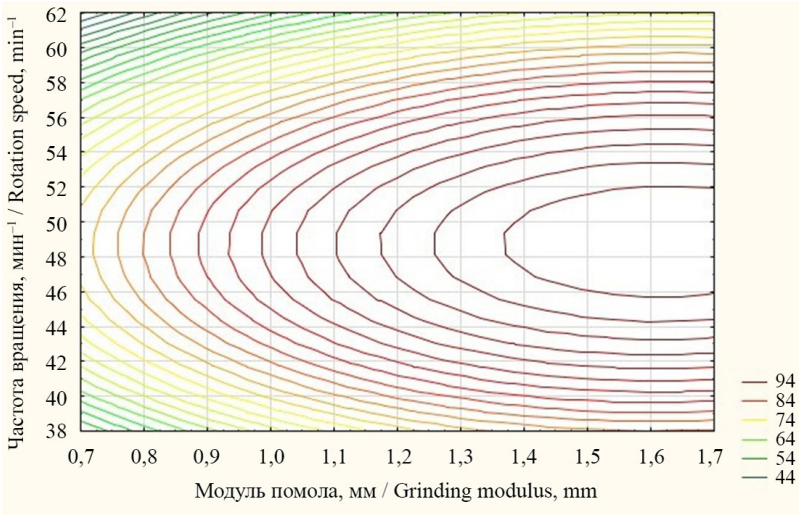
F i g. 6. Influence of raw material temperature and rotational speed of the movable operating elements of a basket pelleter on the disintegration time of feed pellets

На рисунке 7 показано двумерное сечение поверхности отклика, характеризующее зависимость времени распада гранул корма в воде от модуля помола и частоты вращения рабочих органов корзинного гранулятора. Из графика на рисунке 7 следует, что наилучший результат гранулирования, при котором время распада гранул максимально и составляет 94 мин, достигается при значениях модуля помола 1,36–1,80 мм и частоты вращения рабочих органов гранулятора 45,8–52,0 мин$^{-1}$. При увеличении значений модуля помола до 1,8 мм и частоты вращения рабочих органов до 52 мин$^{-1}$ происходит повышение длительности распада гранул, которое при дальнейшем увеличении значений этих факторов сменяется снижением водостойкости гранул корма.

Анализ результатов эксперимента

Таким образом, на время распада гранул корма в воде в наибольшей степени влияют влажность сырья, его модуль помола и частота вращения рабочих органов корзинного гранулятора. Увеличение значений этих факторов до определенного уровня повышает устойчивость гранул корма к действию воды. Установлено, что увеличение влажности сырья более 42 %, модуля помола более 1,8 мм и частоты вращения рабочих органов гранулятора более 52 мин$^{-1}$ приводит к уменьшению времени полного распада гранул в воде, то есть ухудшает их качество.

Влияние температуры сырья на время распада гранул корма менее существенно, чем трех остальных факторов. Тем не менее, увеличение температуры сырья до 56 °C улучшает качество получаемых гранул корма для рыб, повышая их водостойкость.



Р и с. 7. Влияние модуля помола сырья и частоты вращения рабочих органов корзинного гранулятора на время распада гранул корма

F i g. 7. Influence of raw material grinding modulus and rotation speed of basket pelleter movable operating elements on disintegration time of feed pellets

На основании результатов экспериментов был сделан вывод, что оптимальная величина времени распада гранул корма в воде, равная 92–96 мин, достигается при следующих диапазонах значений факторов процесса влажного гранулирования: влажность сырья – 40...42 %; температура сырья – 42...56 °С, модуль помола сырья 1,4...1,8 мм (средний помол); частота вращения рабочих органов корзинного гранулятора – 47...51 мин$^{-1}$.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании результатов экспериментов был сделан вывод о том, что установленные для процесса влажного гранулирования в корзинном грануляторе зависимости изменения времени распада гранул в воде (водостойкости) от влажности и температуры сырья, модуля его помола и частоты вращения прессующих рабочих органов гранулятора соответствуют аналогичным зависимостям, ранее установленным для процесса гранулирования в грануляторах с вертикальной кольцевой матрицей.

Объяснение установленным закономерностям изменения параметра оптимизации процесса влажного гранулирования корма в корзинном грануляторе (в данном случае времени распада гранул в воде) при варьировании входных факторов может быть дано, исходя из ранее установленных закономерностей для процесса гранулирования в пресс-грануляторе.

Так, увеличение водостойкости гранул при повышении влажности растительного сырья объясняется лучшим связыванием частиц гранул, содержащих больше воды [19], вследствие ее агглютинирующей способности [23]. Но вода при чрезмерном увлажнении сырья снижает трение в канале фильеры в процессе

гранулирования, что отрицательно влияет на водостойкость гранул [24]. Гранулы, изготовленные из недостаточно влажного сырья, также являются непрочными и быстро распадаются в воде.

Установленные рациональные значения модуля помола растительного сырья 1,4–1,8 мм (средний помол) также примерно соответствуют рациональным значениям этого показателя, установленным для процесса гранулирования в пресс-грануляторе с вертикальной матрицей [25], как и тот факт, что мелкий помол сырья (модуль помола менее 1 мм) и крупный помол (модуль более 2 мм) ухудшают водостойкость гранул [19; 26]. Дело в том, что именно при среднем помоле (модуль помола 1–2 мм) в растительном сырье увеличивается межмолекулярная адгезия, что повышает плотность и водостойкость гранул [26].

Уменьшение размера частиц растительного сырья вплоть до величины 1 мм повышает их капиллярность, способствуя более равномерному проникновению воды при увлажнении [27]. Это утверждение соответствует полученным нами экспериментальным данным, свидетельствующим о том, что совместное уменьшение модуля помола и увеличение влажности сырья обеспечивает улучшение водостойкости гранул корма.

Температура растительного сырья влияет на связывание частиц в гранулах, нагрев способствует их лучшему склеиванию [26; 28], в том числе в результате желатинизации крахмала, повышению плотности и водостойкости гранул [29; 30], что было подтверждено в наших опытах. Однако чрезмерное увеличение температуры сырья приводит к его обезвоживанию, что ухудшает качество гранул.

Влияние частоты вращения рабочих органов гранулятора на параметры процесса гранулирования и качество гранул ранее было почти не исследовано. Нами установлено, что при увеличении частоты вращения рабочих органов выше рациональных значений гранулы корма становятся менее плотными и водостойкими. Это можно объяснить тем, что в результате вызванного увеличением частоты вращения рабочего органа значительного повышения давления гранулирования происходит и значительное повышение температуры сырья, что снижает его влажность, делая гранулы менее прочными [31; 32]. Уменьшение частоты вращения рабочих органов ниже рациональных значений приводит к формированию усилия экструзионной лопасти (давления гранулирования), недостаточного для продавливания сырья через фильеры и формирования полноценных гранул.

Увеличение частоты вращения рабочих органов гранулятора от минимальных до рациональных значений приводит к повышению скорости сжатия сырья в области между матрицей и экструзионной лопастью и в фильере. Увеличение степени сжатия сырья в фильере приводит к его уплотнению и получению более плотных и водостойких гранул корма, что соответствует экспериментальным данным для пресс-грануляторов с кольцевой матрицей[8] [33]. Но чрезмерное увеличение частоты вращения рабочих органов формирует значительное усилие в области между

[8] Šafran B., Radmanović K., Jug M., Lučić Beljo R., Lojen T., Risović S. Influence of Pressing Temperature and Additive on Mechanical Properties of Wood Pellets // Natural Resources, Green Technology & Sustainable Development (5–8 June 2018). Faculty of Food Technology and Biotechnology, University of Zagreb, Croatia. 2018. Vol. 3. P. 141–148. URL: https://www.sumins.hr/wp-content/uploads/2019/07/green3-proceedings.pdf (дата обращения: 23.11.2025).

матрицей и экструзионной лопастью и в канале фильеры, что приводит к повышению температуры гранулируемого сырья, а вследствие этого к интенсивному испарению воды. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению связности между частицами сырья и получению недостаточно прочных и водостойких гранул, что соответствует данным [34] для гранулятора с вертикальной кольцевой матрицей.

Таким образом, в результате выполненных экспериментальных исследований были установлены рациональные значения факторов процесса влажного гранулирования растительного сырья в корзинном грануляторе, позволяющие производить гранулированный корм для рыб и их мальков, соответствующий зоотехническим требованиям к качеству кормов по водостойкости. Оптимальная величина времени распада гранул корма в воде, равная 92–96 мин, достигается при следующих диапазонах значений параметров процесса влажного гранулирования: влажность сырья – 40...42 %; температура сырья – 42...56 °С; модуль помола сырья 1,4–1,8 мм (средний помол); частота вращения рабочих органов корзинного гранулятора – 47...51 мин$^{-1}$.

В результате анализа экспериментальных данных был восполнен существующий пробел в научных знаниях о взаимодействии между значимыми факторами процесса влажного гранулирования растительного сырья в корзинном грануляторе и их влиянии на результаты процесса, а именно на водостойкость гранул корма для рыб.

Поскольку было установлено, что закономерности процесса гранулирования в корзинном грануляторе и пресс-грануляторе с вертикальной кольцевой матрицей схожи, то перспективным направлением исследований является разработка и верификация комплексной физико-математической модели процесса гранулирования растительного сырья. Такая модель должна описывать взаимосвязи между тепло- и массопереносом, реологическими свойствами сырья при изменяющихся температуре и влажности, а также гидродинамикой его течения в каналах фильеры под действием рабочих органов, учитывать нелинейные взаимодействия технологических параметров и позволять предсказывать оптимальные режимы гранулирования при заданных требованиях к качеству конечного продукта. Создание такой математической модели станет мощным инструментом для инженерного проектирования и оптимизации оборудования для гранулирования кормов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ferenczi D., Bodnar K. The Role of Cereals in Carp Feeding (Short Review). *Research Journal of Agricultural Science.* 2024;56(1):77–83. URL: https://clck.ru/3NcXAn (дата обращения: 21.11.2024).
2. Kuebutornye F.K.A., Roy K., Folorunso E.A., Mraz J. Plant-Based Feed Additives in *Cyprinus Carpio* Aquaculture. *Reviews in Aquaculture.* 2024;16(1):309–336. https://doi.org/10.1111/raq.12840
3. Gao S., Jin J., Liu H., Han D., Zhu X., Yang Yu., et al. Effects of Pelleted and Extruded Feed of Different Ingredients Particle Sizes on Feed Quality and Growth Performance of Gibel Carp (*Carassius Gibelio* Var. CAS V). *Aquaculture.* 2019;511:734236. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.734236
4. Харченко Е.Н., Ульрих Е.В., Колокольцова Е.А. Эффективность использования полнорационного гранулированного комбикорма для садкового карпа. *Достижения науки и техники АПК.* 2019;33(3):55–57. https://doi.org/10.24411/0235-2451-2019-10314

5. Kumaraguru Vasagam K.P., Ambasankar K., Dayal J.S. An Overview of Aquafeed Formulation and Processing. In: Advances in Marine and Brackishwater Aquaculture. Springer, New Delhi. 2015. p. 227–240. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2271-2_21
6. Regupathi E.R., Suriya A., Geethapriya R.S. On Studying Different Types of Pelletizing System for Fish Feed. *International Journal of Fishiries and Aquatic Studies.* 2019;7(2):187–192. URL: https://www.fisheriesjournal.com/archives/2019/vol7issue2/PartC/7-2-4-857.pdf (дата обращения: 21.11.2024).
7. Blagov D.A., Gizatov A.Ya., Smakuyev D.R., Kosilov V.I., Pogodaev V.A., Tamaev S.A. Overview of Feed Granulation Technology and Technical Means for its Implementation. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. The International Scientific and Practical Conference Biotechnology in the Agro-Industrial Complex and Sustainable Environmental Management (22 October 2020). Veliky Novgorod. 2020;613:012018. https://doi.org/10.1088/1755-1315/613/1/012018
8. Куликов А.В., Литвинчук А.А., Куликова О.М., Данилюк А.С., Безущёнок А.А. Исследование возможности и определение параметров получения микрогранул рыбных комбикормов для выращивания мальков. *Пищевая промышленность: наука и технологии.* 2019;12(2):43-51. URL: https://foodindustry.belal.by/jour/article/view/402 (дата обращения: 21.11.2024).
9. Vervaet C., Baert L., Risha P.A., Remon J.-P. The Influence of the Extrusion Screen on Pellet Quality Using an Instrumented Basket Extruder. *International Journal of Pharmaceutics.* 1994;107(1):29–39. https://doi.org/10.1016/0378-5173(94)90299-2
10. Zukowski S.R., Kodam M., Khurana S., Taylor J., Frishcosy M., Hercamp J., et al. Performance Comparison of Dome and Basket Extrusion Granulation. *Chemical Engineering Research and Design.* 2020;160:190–198. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2020.04.037
11. Fekete R., Peciar P., Juriga M., Gužela Š., Peciarová M., Horváth D., et al. Pressure and Liquid Distribution under the Blade of a Basket Extruder of Continuous Wet Granulation of Model Material. *Journal of Manufacturing and Materials Processing.* 2024;8(3):127. https://doi.org/10.3390/jmmp8030127
12. Singh M., Shirazian S., Ranade V., Walker G.M., Kumar A. Challenges and Opportunities in Modelling Wet Granulation in Pharmaceutical Industry – a Critical Review. *Powder Technology.* 2022;403:117380. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117380
13. Chen P., Ansari M.J., Bokov D., Suksatan W., Rahman M.L., Sarjadi M.S. A Review on Key Aspects of Wet Granulation Process for Continuous Pharmaceutical Manufacturing of Solid Dosage Oral Formulations. *Arabian Journal of Chemistry.* 2022;15(2):103598. https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2021.103598
14. Baert L., Down G.R.B. A Comparison of Two Methods of Instrumenting a Small-Scale Basket Extruder. *International Journal of Pharmaceutics.* 1994;107(3):219–222. https://doi.org/10.1016/0378-5173(94)90437-5
15. Zhang M., Li Y. Spheronisation of a Basket Screen-Extruded Paste Using Screens of Different Hole Diameters. *Powder Technology.* 2016;299:199–209. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.05.038
16. Пахомов В.И., Брагинец С.В., Бахчевников О.Н., Деев К.А. Роторный гранулятор для влажных материалов. Патент 218265 Российская Федерация. 18 мая 2023. URL: https://istina.msu.ru/patents/564514548/ (дата обращения: 23.09.2024).
17. Пахомов В.И., Брагинец С.В., Алферов А.С., Бахчевников О.Н., Деев К.А. Корзинный гранулятор для приготовления кормов в аквакультуре. *Техника и оборудование для села.* 2022;(12):32–34. https://doi.org/10.33267/2072-9642-2022-12-32-34
18. Hlaváč D., Másílko J., Anton-Pardo M., Hartman P., Regenda J., Vejsada P., et al. Compound Feeds and Cereals as Potential Tools for Improved Carp *Cyprinus Carpio* Production. *Aquaculture Environment Interactions.* 2016;8:647–657. https://doi.org/10.3354/aei00206
19. Muramatsu K., Massuquetto A., Dahlke F., Maiorka A. Factors that Affect Pellet Quality: A Review. *Journal of Agricultural Science and Technology.* 2015:717–722. https://doi.org/10.17265/2161-6256/2015.09.002
20. Peeters M., Barrera Jiménez A.A., Matsunami K., Ghijs M., dos Santos Schultz E., Roudgar M., et al. Analysis of the Effect of Formulation Properties and Process Parameters on Granule Formation

in Twin-Screw Wet Granulation. *International Journal of Pharmaceutics.* 2024;650:123671. https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2023.123671
21. Durakovic B. Design of Experiments Application, Concepts, Examples: State of the Art. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences.* 2017;5(3):421–439. URL: file:///C:/Users/User/Downloads/DOE-GUD.pdf (дата обращения: 21.09.2024).
22. Roy R., Hinduja S., Teti R. Recent Advances in Engineering Design Optimisation: Challenges and Future Trends. *CIRP Annals.* 2008;57(2):697–715. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.09.007
23. Ungureanu N., Vladut V., Voicu G., Dinca M.N., Zabava B.S. Influence of Biomass Moisture Content on Pellet Properties – Review. *Engineering for Rural Development.* 2018;17:1876–1883. https://doi.org/10.22616/ERDev2018.17.N449
24. Abdollahi M.R., Ravindran V., Wester T.J., Ravindran G., Thomas D.V. Effect of Improved Pellet Quality from the Addition of a Pellet Binder and/or Moisture to a Wheat-Based Diet Conditioned at Two Different Temperatures on Performance, Apparent Metabolisable Energy and Ileal Digestibility of Starch and Nitrogen in Broilers. *Animal Feed Science and Technology.* 2012;175(3–4):150–157. https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2012.05.001
25. Stelte W., Holm J.K., Sanadi A.R., Barsberg S., Ahrenfeldt J., Henriksen U.B. A Study of Bonding and Failure Mechanisms in Fuel Pellets from Different Biomass Resources. *Biomass and Bioenergy.* 2011;35(2):910–918. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.11.003
26. Dujmović M., Šafran B., Jug M., Radmanović K., Antonović A. Biomass Pelletizing Process: A Review. *Drvna Industrija.* 2022;73(1):99–106. https://doi.org/10.5552/drvind.2022.2139
27. Gageanu I., Cujbescu D., Persu C., Tudor P., Cardei P., Matache M., et al. Influence of Input and Control Parameters on the Process of Pelleting Powdered Biomass. *Energies.* 2021;14:4104. https://doi.org/10.3390/en14144104
28. Segerstrom M., Larsson S.H. Clarifying Sub-Processes in Continuous Ring Die Pelletizing Through Die Temperature Control. *Fuel Processing Technology.* 2014;123:122–126. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.02.008
29. Netto M.T., Massuquetto A., Krabbe E.L., Surek D., Oliveira S.G., Maiorka A. Effect of Conditioning Temperature on Pellet Quality, Diet Digestibility, and Broiler Performance. *Journal of Applied Poultry Research.* 2019;28(4):963–973. https://doi.org/10.3382/japr/pfz056
30. Dos Santos R.O.F., Bassi L.S., Schramm V.G., da Rocha C., Dahlke F., Krabbe E.L., et al. Effect of Conditioning Temperature and Retention Time on Pellet Quality, Ileal Digestibility, and Growth Performance of Broiler Chickens. *Livestock Science.* 2020;240:104110. https://doi.org/10.1016/j.livsci.2020.104110
31. Nielsen S.K., Mando M., Rosenorn A.B. Review of Die Design and Process Parameters in the Biomass Pelleting Process. *Powder Technology.* 2020;364:971–985. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.10.051
32. Agar D.A., Rudolfsson M., Kalén G., Campargue M., Perez D.D.S., Larsson S.H. A Systematic Study of Ring-Die Pellet Production from Forest and Agricultural Biomass. *Fuel Processing Technology.* 2018;180:47–55. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.08.006
33. Thomas M., van der Poel A.F.B. Fundamental Factors in Feed Manufacturing: Towards a Unifying Conditioning/Pelleting Framework. *Animal Feed Science and Technology.* 2020;268:114612. https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2020.114612
34. Whittaker C., Shield I. Factors Affecting Wood, Energy Grass and Straw Pellet Durability – A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2017;71:1–11. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.119

Об авторах:

Брагинец Сергей Валерьевич, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник отдела переработки продукции растениеводства Аграрного научного центра «Донской» (347740, Российская Федерация, г. Зерноград, ул. Научный городок, д. 3), профессор кафедры технологий и оборудования переработки продукции агропромышленного комплекса Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону,

пл. Гагарина, д. 1), ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7137-5692, Researcher ID: Y-6307-2019, Scopus ID: 57202639521, SPIN-код: 4849-0287, sbraginets@mail.ru

Пахомов Виктор Иванович, доктор технических наук, член-корреспондент РАН, директор Аграрного научного центра «Донской» (347740, Российская Федерация, г. Зерноград, ул. Научный городок, д. 3), заведующий кафедрой технологий и оборудования переработки продукции агропромышленного комплекса Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8715-0655, Researcher ID: Y-7085-2019, Scopus ID: 55659146100, SPIN-код: 5815-4913, vniizk30@mail.ru

Бахчевников Олег Николаевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела переработки продукции растениеводства Аграрного научного центра «Донской» (347740, Российская Федерация, г. Зерноград, ул. Научный городок, д. 3), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3362-5627, Scopus ID: 57202648620, SPIN-код: 3350-9055, oleg-b@list.ru

Алферов Александр Сергеевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела переработки продукции растениеводства Аграрного научного центра «Донской» (347740, Российская Федерация, г. Зерноград, ул. Научный городок, д. 3), ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5210-781X, SPIN-код: 7803-6092, alfa-8303@yandex.ru

Деев Константин Александрович, инженер отдела переработки продукции растениеводства Аграрного научного центра «Донской» (347740, Российская Федерация, г. Зерноград, ул. Научный городок, д. 3), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4160-0382, SPIN-код: 9005-9443, prosto.deev@yandex.ru

Вклад авторов:

С. В. Брагинец – создание и подготовка рукописи: критический анализ черновика рукописи, внесение замечаний и исправлений членами исследовательской группы, в том числе на этапах до и после публикации.

В. И. Пахомов – формулирование идеи исследования, целей и задач.

О. Н. Бахчевников – создание и подготовка рукописи: написание черновика рукописи, включая его перевод на иностранный язык.

А. С. Алферов – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор доказательств.

К. А. Деев – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор доказательств.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила в редакцию 06.12.2024; поступила после рецензирования 10.03.2025; принята к публикации 19.03.2025

REFERENCES

1. Ferenczi D., Bodnar K. The Role of Cereals in Carp Feeding (Short Review). *Research Journal of Agricultural Science.* 2024;56(1):77–83. Available at: https://clck.ru/3NcXAn (accessed 21.11.2024).
2. Kuebutornye F.K.A., Roy K., Folorunso E.A., Mraz J. Plant-Based Feed Additives in *Cyprinus Carpio* Aquaculture. *Reviews in Aquaculture.* 2024;16(1):309–336. https://doi.org/10.1111/raq.12840
3. Gao S., Jin J., Liu H., Han D., Zhu X., Yang Yu., et al. Effects of Pelleted and Extruded Feed of Different Ingredients Particle Sizes on Feed Quality and Growth Performance of Gibel Carp (*Carassius Gibelio* Var. CAS V). *Aquaculture.* 2019;511:734236. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.734236

4. Kharchenko E.N., Ulrikh E.V., Kolokoltsova E.A. Performance Efficiency of Complete Granulated Mixed Feed for Cage Carp. *Achievements of Science and Technology of AICis.* 2019;33(3):55–57. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.24411/0235-2451-2019-10314
5. Kumaraguru Vasagam K.P., Ambasankar K., Dayal J.S. An Overview of Aquafeed Formulation and Processing. In: Advances in Marine and Brackishwater Aquaculture. Springer, New Delhi. 2015. p. 227–240. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2271-2_21
6. Regupathi E.R., Suriya A., Geethapriya R.S. On Studying Different Types of Pelletizing System for Fish Feed. *International Journal of Fishiries and Aquatic Studies.* 2019;7(2):187–192. Available at: https://www.fisheriesjournal.com/archives/2019/vol7issue2/PartC/7-2-4-857.pdf (accessed 21.11.2024).
7. Blagov D.A., Gizatov A.Ya., Smakuyev D.R., Kosilov V.I., Pogodaev V.A., Tamaev S.A. Overview of Feed Granulation Technology and Technical Means for its Implementation. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. The International Scientific and Practical Conference Biotechnology in the Agro-Industrial Complex and Sustainable Environmental Management (22 October 2020). Veliky Novgorod. 2020;613:012018. https://doi.org/10.1088/1755-1315/613/1/012018
8. Kulikou A.V., Litvinchuk A.A., Kulikova O.M., Danilyuk A.S., Bezushchonok A.A. Investigation of Opportunities and Determination of Parameters of Production of Microgranules of Fish Fodder for Fry. *Food Industry: Science and Technology.* 2019;12(2):43-51. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: https://foodindustry.belal.by/jour/article/view/402 (accessed 21.11.2024).
9. Vervaet C., Baert L., Risha P.A., Remon J.-P. The Influence of the Extrusion Screen on Pellet Quality Using an Instrumented Basket Extruder. *International Journal of Pharmaceutics.* 1994;107(1):29–39. https://doi.org/10.1016/0378-5173(94)90299-2
10. Zukowski S.R., Kodam M., Khurana S., Taylor J., Frishcosy M., Hercamp J., et al. Performance Comparison of Dome and Basket Extrusion Granulation. *Chemical Engineering Research and Design.* 2020;160:190–198. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2020.04.037
11. Fekete R., Peciar P., Juriga M., Gužela Š., Peciarová M., Horváth D., et al. Pressure and Liquid Distribution under the Blade of a Basket Extruder of Continuous Wet Granulation of Model Material. *Journal of Manufacturing and Materials Processing.* 2024;8(3):127. https://doi.org/10.3390/jmmp8030127
12. Singh M., Shirazian S., Ranade V., Walker G.M., Kumar A. Challenges and Opportunities in Modelling Wet Granulation in Pharmaceutical Industry – a Critical Review. *Powder Technology.* 2022;403:117380. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117380
13. Chen P., Ansari M.J., Bokov D., Suksatan W., Rahman M.L., Sarjadi M.S. A Review on Key Aspects of Wet Granulation Process for Continuous Pharmaceutical Manufacturing of Solid Dosage Oral Formulations. *Arabian Journal of Chemistry.* 2022;15(2):103598. https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2021.103598
14. Baert L., Down G.R.B. A Comparison of Two Methods of Instrumenting a Small-Scale Basket Extruder. *International Journal of Pharmaceutics.* 1994;107(3):219–222. https://doi.org/10.1016/0378-5173(94)90437-5
15. Zhang M., Li Y. Spheronisation of a Basket Screen-Extruded Paste Using Screens of Different Hole Diameters. *Powder Technology.* 2016;299:199–209. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.05.038
16. Pakhomov V.I., Braginets S.V., Bakhchevnikov O.N., Deev K.A. [Rotary Granulator for Wet Materials]. Patent 218265 Russian Federation. 2023 May 18. (In Russ.) Available at: https://istina.msu.ru/patents/564514548/ (accessed 23.09.2024).
17. Pakhomov V.I., Braginets S.V., Alferov A.S., Bakhchevnikov O.N., Deev K.A. Basket Pellet Mill for Aquaculture Feed Preparation. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2022;(12):32–34. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.33267/2072-9642-2022-12-32-34
18. Hlaváč D., Másílko J., Anton-Pardo M., Hartman P., Regenda J., Vejsada P., et al. Compound Feeds and Cereals as Potential Tools for Improved Carp *Cyprinus Carpio* Production. *Aquaculture Environment Interactions.* 2016;8:647–657. https://doi.org/10.3354/aei00206

19. Muramatsu K., Massuquetto A., Dahlke F., Maiorka A. Factors that Affect Pellet Quality: A Review. *Journal of Agricultural Science and Technology.* 2015:717–722. https://doi.org/10.17265/2161-6256/2015.09.002
20. Peeters M., Barrera Jiménez A.A., Matsunami K., Ghijs M., dos Santos Schultz E., Roudgar M., et al. Analysis of the Effect of Formulation Properties and Process Parameters on Granule Formation in Twin-Screw Wet Granulation. *International Journal of Pharmaceutics.* 2024;650:123671. https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2023.123671
21. Durakovic B. Design of Experiments Application, Concepts, Examples: State of the Art. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences.* 2017;5(3):421–439. Available at: file:///C:/Users/User/Downloads/DOE-GUD.pdf (accessed 21.09.2024).
22. Roy R., Hinduja S., Teti R. Recent Advances in Engineering Design Optimisation: Challenges and Future Trends. *CIRP Annals.* 2008;57(2):697–715. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.09.007
23. Ungureanu N., Vladut V., Voicu G., Dinca M.N., Zabava B.S. Influence of Biomass Moisture Content on Pellet Properties – Review. *Engineering for Rural Development.* 2018;17:1876–1883. https://doi.org/10.22616/ERDev2018.17.N449
24. Abdollahi M.R., Ravindran V., Wester T.J., Ravindran G., Thomas D.V. Effect of Improved Pellet Quality from the Addition of a Pellet Binder and/or Moisture to a Wheat-Based Diet Conditioned at Two Different Temperatures on Performance, Apparent Metabolisable Energy and Ileal Digestibility of Starch and Nitrogen in Broilers. *Animal Feed Science and Technology.* 2012;175(3–4):150–157. https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2012.05.001
25. Stelte W., Holm J.K., Sanadi A.R., Barsberg S., Ahrenfeldt J., Henriksen U.B. A Study of Bonding and Failure Mechanisms in Fuel Pellets from Different Biomass Resources. *Biomass and Bioenergy.* 2011;35(2):910–918. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.11.003
26. Dujmović M., Šafran B., Jug M., Radmanović K., Antonović A. Biomass Pelletizing Process: A Review. *Drvna Industrija.* 2022;73(1):99–106. https://doi.org/10.5552/drvind.2022.2139
27. Gageanu I., Cujbescu D., Persu C., Tudor P., Cardei P., Matache M., et al. Influence of Input and Control Parameters on the Process of Pelleting Powdered Biomass. *Energies.* 2021;14:4104. https://doi.org/10.3390/en14144104
28. Segerstrom M., Larsson S.H. Clarifying Sub-Processes in Continuous Ring Die Pelletizing Through Die Temperature Control. *Fuel Processing Technology.* 2014;123:122–126. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.02.008
29. Netto M.T., Massuquetto A., Krabbe E.L., Surek D., Oliveira S.G., Maiorka A. Effect of Conditioning Temperature on Pellet Quality, Diet Digestibility, and Broiler Performance. *Journal of Applied Poultry Research.* 2019;28(4):963–973. https://doi.org/10.3382/japr/pfz056
30. Dos Santos R.O.F., Bassi L.S., Schramm V.G., da Rocha C., Dahlke F., Krabbe E.L., et al. Effect of Conditioning Temperature and Retention Time on Pellet Quality, Ileal Digestibility, and Growth Performance of Broiler Chickens. *Livestock Science.* 2020;240:104110. https://doi.org/10.1016/j.livsci.2020.104110
31. Nielsen S.K., Mando M., Rosenorn A.B. Review of Die Design and Process Parameters in the Biomass Pelleting Process. *Powder Technology.* 2020;364:971–985. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.10.051
32. Agar D.A., Rudolfsson M., Kalén G., Campargue M., Perez D.D.S., Larsson S.H. A Systematic Study of Ring-Die Pellet Production from Forest and Agricultural Biomass. *Fuel Processing Technology.* 2018;180:47–55. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.08.006
33. Thomas M., van der Poel A.F.B. Fundamental Factors in Feed Manufacturing: Towards a Unifying Conditioning/Pelleting Framework. *Animal Feed Science and Technology.* 2020;268:114612. https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2020.114612
34. Whittaker C., Shield I. Factors Affecting Wood, Energy Grass and Straw Pellet Durability – A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2017;71:1–11. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.119

About the authors:

Sergey V. Braginets, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Leading Researcher of the Department Vegetable Feedstock Processing, Agricultural Research Center "Donskoy" (3 Nauchny Gorodok St., Zernograd 347740, Russian Federation), Professor of the Department of Technologies and Equipment for Processing Products of the Agro-Industrial Complex, Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344003, Russian Federation), ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7137-5692, Researcher ID: Y-6307-2019, Scopus ID: 57202639521, SPIN-code: 4849-0287, sbraginets@mail.ru

Viktor I. Pakhomov, Dr.Sci. (Eng.), Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Director, Agricultural Research Center "Donskoy" (3 Nauchny Gorodok St., Zernograd 347740, Russian Federation), Head of the Department of Technologies and Equipment for Processing Products of the Agro-Industrial Complex, Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344003, Russian Federation), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8715-0655, Researcher ID: Y-7085-2019, Scopus ID: 55659146100, SPIN-code: 5815-4913, vniizk30@mail.ru

Oleg N. Bakhchevnikov, Cand.Sci. (Eng.), Senior Scientific Worker of the Department Vegetable Feedstock Processing, Agricultural Research Center "Donskoy" (3 Nauchny Gorodok St., Zernograd 347740, Russian Federation), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3362-5627, Scopus ID: 57202648620, SPIN-code: 3350-9055, oleg-b@list.ru

Aleksandr S. Alferov, Cand.Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Department Vegetable Feedstock Processing, Agricultural Research Center "Donskoy" (3 Nauchny Gorodok St., Zernograd 347740, Russian Federation), ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5210-781X, SPIN-code: 7803-6092, alfa-8303@yandex.ru

Konstantin A. Deev, Engineer of the Department Vegetable Feedstock Processing, Agricultural Research Center "Donskoy" (3 Nauchny Gorodok St., Zernograd 347740, Russian Federation), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4160-0382, SPIN-code: 9005-9443, prosto.deev@yandex.ru

Authors contribution:

S. V. Braginets – preparing the article manuscript: critical analysis of the manuscript, comments and corrections made by the members of the research group during the pre-publication and post-publication stages.

V. I. Pakhomov – formulating the study idea, aims and objectives.

O. N. Bakhchevnikov – preparing the manuscript, specifically writing the initial manuscript version (including its translation into the English language).

A. S. Alferov – conducting the study, specifically performing the experiments and collecting data/evidence.

K. A. Deev – conducting the study, specifically performing the experiments and collecting data/evidence.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 06.12.2024; revised 10.03.2025; accepted 19.03.2025

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ / TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT

https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202503.414-442
EDN: https://elibrary.ru/sgfvlr
УДК 004.7:551.5

Оригинальная статья / Original article

Разработка и апробация программно-аппаратного комплекса с веб-интерфейсом отображения данных мониторинга локальных метеоусловий

Ю. И. Блохин[1] ✉, **А. С. Черяев**[1,2], **С. Ю. Блохина**[1]
[1] *Агрофизический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация*
[2] *Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация*
✉ *blohin3k4@gmail.com*

Аннотация

Введение. Внедрение автоматических метеостанций с применением технологий Интернета вещей (IoT) является новым этапом развития интеллектуального сельхозпроизводства. Современные веб-сервисы и приложения, использующие данные с IoT автоматических метеостанций обеспечивают пользователей репрезентативной информацией о климатических условиях в режиме реального времени, что способствует более эффективному планированию полевых работ и снижению рисков, связанных с изменением погодных условий. Важным аспектом получения и анализа актуальной метеорологической информации является разработка удобных для пользователей интерфейсов.

Цель исследования. Выполнить обзор современных метеостанций и технологий разработки программного обеспечения для оперативного отображения климатических данных для сельского хозяйства; разработать и апробировать программно-аппаратный комплекс с веб-интерфейсом отображения данных мониторинга локальных метеоусловий с частотой отображения данных не менее одного раза в час.

Материалы и методы. В качестве методов и инструментов решения поставленной задачи использовался современный инструментарий веб-разработки на платформе ASP.NET Core MVC. Разработан экспериментальный образец бюджетной IoT автоматической метеостанции для получения данных о локальных метеоусловиях в течении вегетационного периода. Составлена аппаратная и программная архитектура IoT автоматической метеостанции. Микрокомпьютер Raspberry Pi Zero обеспечивает выполнение скриптов опроса многоканального совмещенного метеодатчика на языке Java для записи в локальную и удаленную систему управления базами данных PostgreSQL. Графики динамики локальных метеоусловий созданы с помощью JavaScript-библиотеки ApexCharts. Исследованы энергопотребление и динамика заряда аккумулятора IoT автоматической метеостанции от солнечной панели в полевых условиях.

Результаты исследования. Представлен обзор современных метеостанций и проведен сравнительный анализ технологий разработки программного обеспечения для оперативного отображения данных. Создан и апробирован алгоритм извлечения

© Блохин Ю. И., Черяев А. С., Блохина С. Ю., 2025

Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

информации из базы данных и отображения графиков и таблиц на веб-сайте с помощью веб-приложения. Обозначены ключевые блоки кода с пояснениями, описан алгоритм развертывания веб-приложения в интернете. Разработан фронтэнд веб-приложения для наглядной визуализации данных IoT автоматической метеостанции. Представлены динамика метеоусловий, полученная IoT автоматической метеостанцией, результаты сравнения отдельных показателей с данными из открытых источников. Веб-приложение протестировано и развернуто на аппаратном сервере с доступом в интернет.

Обсуждение и заключение. Результаты полевых испытаний IoT автоматической метеостанции и веб-приложения в 2024 г. показали высокую производительность системы, минимизацию задержек при негативных условиях внешней среды (сильный дождь, ветер, низкие и высокие температуры), стабильное наполнение базы данных и отображение графиков метеоусловий на сайте. Разработанная IoT автоматическая метеостанция, построенная по модульному принципу, с совмещенным метеодатчиком является более компактной и бюджетной в сравнении с готовыми решениями, существующими на рынке. Непрерывный поток информации, открытая аппаратная архитектура обеспечивают автономность системы за счет подзарядки аккумулятора от солнечной батареи и алгоритма режима сна. В дальнейшем предполагается проведение градуировки совмещенного датчика в лабораторных условиях для повышения точности показаний или замены совмещенного датчика на классические механические датчики с незначительным изменением аппаратной и программной платформы. Для работы с динамическими моделями продукционного процесса в систему планируется добавить интерфейс и полевые датчики.

Ключевые слова: веб-приложение, фронтэнд, ASP.NET Core MVC, IoT, метеостанция, мониторинг параметров окружающей среды

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Блохин Ю.И., Черяев А.С., Блохина С.Ю. Разработка и апробация программно-аппаратного комплекса с веб-интерфейсом отображения данных мониторинга локальных метеоусловий. *Инженерные технологии и системы.* 2025;35(3):414–442. https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202503.414-442

Developing and Testing of a Hardware and Software Complex with a Web Interface for Displaying Local Meteorological Monitoring Data

Yu. I. Blokhin[a] ✉, **A. S. Cheryaev**[a,b], **S. Yu. Blokhina**[a]
[a] *Agrophysical Research Institute*, *St. Petersburg*, *Russian Federation*
[b] *ITMO University*, *St. Petersburg*, *Russian Federation*
✉ *blohin3k4@gmail.com*

Abstract

Introduction. The implementation of automated weather stations facilitated by Internet of Things (IoT) technologies represents a significant advancement in smart agriculture. Modern web services and applications using the data of IoT-based automated weather stations provide users with representative meteorological data on climatic conditions in real time to enhance the field operations management and reduce risks from changing in meteorological conditions. An important aspect of collecting and analyzing up-to-date meteorological information is the development of user-friendly interfaces.

Aim of the Study. The study is aimed at developing and testing a hardware-software complex with a web interface for displaying local meteorological monitoring data with the frequency of data displaying at least once per hour.
Materials and Methods. The study employs modern web development tool – ASP.NET Core MVC platform to achieve the target tasks. There has been developed an experimental prototype of the low-cost IoT automated weather station to collect data on local weather conditions during the growing season. There has been also developed the hardware and software architecture of the IoT automated weather station. The Raspberry Pi Zero microcomputer provides execution of scripts for polling a multi-channel combined weather sensor in the Java programming language for recording in a local and remote PostgreSQL database management system. The graphs of local weather parameters dynamics have been implemented based on the ApexCharts JavaScript library. In the field conditions, there have been studied the energy consumption and battery charge dynamics of the IoT automated weather station from a solar panel.
Results. The algorithm for information retrieval from a database and displaying graphs and tables on a website using a web application has been developed and tested. The key code blocks with comments are presented, and an algorithm for deploying a web application on the Internet is described. A frontend for a web application for visualizing IoT automated weather station data has been developed. The dynamics of meteorological conditions obtained by the IoT automated weather station are presented, and the results of comparing individual indicators with data from open sources are presented. The web application has been tested and deployed on a hardware server with Internet access. This paper presents a comprehensive review of recent advancements in smart weather stations; a comparative analysis of software technologies for real-time weather monitoring data visualization is conducted.
Discussion and Conclusion. The results of field tests of the IoT automated weather station and web application in 2024 showed high system performance, minimal delays under adverse environmental conditions (heavy rain, wind, low and high temperatures), stable database filling and display of weather conditions graphs on the website. The developed IoT automated weather station, built on a modular principle, with a combined weather sensor, is more compact and cost-effective compared to ready-made solutions existing on the market. Continuous information flow and open hardware architecture ensures the autonomy of the system due to battery recharging from a solar panel and a sleep mode algorithm. In the future, it is planned to calibrate the combined sensor in laboratory conditions to improve the accuracy of readings, or replace the combined sensor with classic mechanical sensors with minor changes in the hardware and software platform. To work with dynamic models of the production process, it is planned to add an interface and field sensors to the system.

Keywords: web application, frontend, ASP.NET Core MVC, IoT, weather station, environmental monitoring

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

For citation: Blokhin Yu.I., Cheryaev A.S., Blokhina S.Yu. Developing and Testing of a Hardware and Software Complex with a Web Interface for Displaying Local Meteorological Monitoring Data. *Engineering Technologies and Systems.* 2025;35(3):414–442. https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202503.414-442

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время разработка и внедрение систем мониторинга на основе технологий Интернет вещей (Internet of things – IoT) является важным направлением исследований для автоматизации технологических процессов в сельскохозяйственной отрасли, все более ориентированной на данные о состоянии посевов, почвы и окружающей среды, получаемые в режиме реального времени на различных объектах [1–3]. Использование автоматических метеостанций (АМС) для сельского хозяйства связано с развитием концепции Интернета вещей [4–6]. Современные IoT АМС, размещенные непосредственно на поле, увеличивают точность сбора данных и помогают оперативно реагировать на изменения погоды,

прогнозировать риски появления вредителей и заболеваний, корректировать проведение агротехнологических операций и, как следствие, эффективно использовать ресурсы [7–9]. Таким образом, IoT АМС являются инструментом для принятия решений, помогающим планировать проведение полевых операций, которые напрямую зависят от погодных условий, а также накапливать базу данных, формируя «историю» каждого поля [10–12].

Наиболее разработанное направление применения IoT технологии – мониторинг параметров окружающей среды с использованием АМС. Современные АМС предлагают широкий спектр функций, включая сбор, хранение и передачу данных, что позволяет создавать прогнозы погоды на основе накопленных показаний датчиков.

Одной из ключевых характеристик IoT АМС является их способность интегрироваться с облачными сервисами и веб-приложениями, что значительно упрощает доступ к данным. Как правило, IoT АМС через веб-сервисы позволяют пользователям получать данные через мобильные приложения или веб-сайты, обеспечивая доступ к информации из любой точки мира при наличии интернет-соединения, что делает управление сельскохозяйственными процессами более гибким и адаптивным. В перспективе поддержка IoT обеспечит интеграцию методов искусственного интеллекта и машинного обучения [13; 14].

Однако, несмотря на преимущества, существуют определенные вызовы и нерешенные проблемы при использовании АМС. Одной из основных проблем является зависимость от стабильного мобильного интернета, предоставляемого местными операторами сотовой связи для передачи данных. В регионах с недостаточной инфраструктурой связи это может стать серьезным ограничением. В таких случаях требуется установка направленных антенн с высоким коэффициентом усиления или увеличение высоты мачты. Альтернативными вариантами могут являться станции ретрансляции данных или физический доступ к станции для считывания данных, что может быть не всегда удобно, экономически оправдано и лишает пользователя возможности оперативно получать данные.

Эффективное управление питанием АМС также имеет важное значение, особенно для систем, установленных на открытом воздухе или в удаленных местах с ограниченным доступом к источникам питания. Большой проблемой в проектировании полевого оборудования является создание защищенных от непогоды корпусов и надежной оснастки устройств, которые могут выдерживать экстремальные условия окружающей среды без потери функциональности [15].

Цель исследования – выполнить обзор современных метеостанций и технологий разработки программного обеспечения для оперативного отображения климатических данных для сельского хозяйства и разработать бюджетный программно-аппаратный комплекс с веб-интерфейсом отображения данных мониторинга локальных метеоусловий, обеспечивающий стабильную работу в полевых условиях.

Задачи исследования: 1) разработать бюджетную IoT метеостанцию с совмещенным метеодатчиком; 2) разработать веб-приложение для извлечения информации из базы данных и отображения графиков и таблиц на веб-сайте.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Критерии выбора современных автоматических метеостанций

Выбор автоматической метеостанции должен основываться на тщательном анализе потребностей хозяйства, в котором разные виды растений по-разному реагируют на условия окружающей среды, доступной инфраструктуры связи и финансовых возможностей. Современные технологии предоставляют широкий спектр решений, которые могут быть адаптированы под конкретные условия и задачи, стоящие перед сельхозтоваропроизводителями.

Стоимость АМС остается важным фактором при выборе оборудования. Базовые модели АМС в основном доступны, однако расширенные версии с дополнительными датчиками и более высокой точностью измерений могут потребовать значительных инвестиций. Тем не менее, затраты на приобретение и обслуживание таких систем могут окупиться за счет повышения урожайности и снижения потерь от неблагоприятных погодных условий.

При выборе АМС важно учитывать не только начальную стоимость оборудования, но и затраты на его обслуживание, модернизацию, возможные обновления программного обеспечения или стоимость подписки на веб-сервисы. Важно отметить, что высокоточные датчики часто требуют регулярной калибровки для поддержания точности измерений, а солнечные панели снижают эффективность при покрытии пылью или снежным покровом и при определенных условиях нуждаются в регулярной очистке.

Кроме того, при выборе АМС необходимо учитывать специфику местности, размер сельскохозяйственного объекта и климатические условия региона для определения места размещения и количества станций. В Российской Федерации наблюдение за сельскохозяйственными территориями осуществляется, главным образом, на основе данных измерений, выполняемых метеостанциями Росгидромета, расстояние между которыми превышает 100 км, что приводит к малой репрезентативности получаемой на них метеорологической информации по отношению к отдельным сельскохозяйственным территориям (особенно в случае пересеченного рельефа местности)[1]. В равнинных районах радиус охвата одной станции может достигать 25–30 км, однако в горных или лесистых зонах этот показатель может существенно снижаться. Радиус действия различных моделей метеостанций может варьироваться из-за типа датчиков, в частности для метеостанций Davis Instruments заявлен радиус охвата 300 м. Отечественная ИТ-компания ООО «Нотос», разработчик проекта «погодавполе.рф», рекомендует размещать одну АМС через каждые 5 км, при этом площадь покрытия составляет от 2 500 до 5 000 га.

Летом 2024 г. в связи с сильнейшей засухой, которая привела к гибели посевов и значительному снижению валового сбора урожая, у ростовских агропроизводителей возникла необходимость в установке 60 автоматических метеостанций

[1] Современный агрометеорологический комплекс КАМК / В. А. Корольков [и др.] // ENVIROMIS–2018 : материалы Междунар. конф. и школы молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды (5 июня – 11 июля 2018 г., г. Томск). Томск : Томский центр научно-технической информации, 2018. С. 394–397. https://elibrary.ru/hbqefb

к 19 имеющимся для более детального наблюдения за погодой, а конкретно за температурой воздуха и почвы, количеством осадков[2]. Подобные проблемы планируют решить ученые Ставропольского государственного аграрного университета совместно с индустриальным партнером – компанией «Теплоком», организуя производство отечественных почвенно-климатических станций для мониторинга состояния сельхозугодий и дистанционной передачи информации на рабочее место или смартфон агронома[3].

Для больших по площади сельскохозяйственных полей, особенно при пересеченной местности и сложном рельефе, целесообразно создание единой измерительно-вычислительной системы на основе IoT-технологий, включающей бюджетные пространственно-разнесенные АМС с оптимальным набором датчиков, сервера и специального ПО для сбора информации со всех АМС, обработки и визуализации динамики метеоусловий в удобном для сельхозпроизводителей виде. АМС могут интегрироваться с IoT-системами управления сельскохозяйственными процессами, такими как системы автоматического полива и мониторинга состояния почвы.

Категории автоматических метеостанций

Для оснащения сельскохозяйственного объекта метеооборудованием руководителю хозяйства или фермеру приходится выбирать из большого количества вариантов в трех ценовых категориях, при этом сложно понять на основе каких критериев необходимо сделать выбор. Для одних пользователей однозначным выбором могут оказаться бюджетные варианты АМС, как правило производства КНР, которые можно приобрести в большом количестве, определенным образом распределив по сельскохозяйственному объекту. Вызывает сомнения надежность и ремонтопригодность таких систем, а реальный опыт пользователей можно оценить в основном из отзывов в интернет-магазине AliExpress. Для пользователей, которым необходимы высокая точность и надежность датчиков в суровых условиях внешней среды, надежное интернет-соединение, отсутствие необходимости постоянного обслуживания, однозначным выбором будут являться профессиональные метеостанции. Как правило, для таких метеостанций необходимо отводить специальное место и создавать зону безопасности с оградой и видеонаблюдением для защиты от вандализма.

Современные АМС можно разделить на три ценовые категории. Состав, технологичность и количество датчиков (каналов сбора данных), установленных на АМС, автономность, сложность аппаратной и программной архитектуры, как правило, определяют цену оборудования. Дополнительно стоимость определяется способом выгрузки данных из памяти АМС и наличием веб-сервисов и приложений для мониторинга метеоусловий, модификациями в рамках одной модели АМС и широким набором расширений. В среднем количество измеряемых параметров для АМС низкой ценовой категории составляет 2...5, средней – 5...8, высокой – от 6 до десятков каналов измерения.

[2] Донскому АПК не хватает 60 метеостанций для наблюдения за погодой [Электронный ресурс] : сайт. URL: https://clck.ru/3NxRsS (дата обращения: 21.10.2024).

[3] Ученые СтГАУ разрабатывают почвенно-климатические станции для агрономов [Электронный ресурс] : сайт. URL: https://clck.ru/3NxSPp (дата обращения: 21.10.2024).

К первой группе (низкая ценовая категория) относятся недорогие малогабаритные метеостанции, наиболее известным производителем которых является фирма MISOL. Стоимость таких метеостанций варьируется от 7 до 15 тыс. руб. В среднем они определяют семь метеопараметров: температуру и влажность воздуха, скорость и направление ветра, атмосферное давление, количество осадков и освещенность. Они больше подходят для оценки метеоусловий в помещениях, теплицах или на придомовых территориях (работают от аккумуляторов или от сети) и не предназначены для профессиональных задач [4]. Основным недостатком данной группы метеостанций являются ограниченные технические характеристики датчиков и высокая компактность их расположения, а также незначительный радиус передачи фиксируемой информации (не более 100 м). Метеоданные, собираемые такими станциями, могут иметь низкую точность относительно АМС более высоких категорий, а в случае расположения в полевых условиях могут предоставлять недостоверные данные во время неблагоприятных погодных условий. Альтернативным вариантом является самостоятельный подбор датчиков по выбранным характеристикам, разработка системы по принципу «сделай сам» (do it yourself – DIY). Популярным выбором DIY АМС является использование Arduino. В работе [16] проведен анализ существующих метеостанций от различных производителей, рассмотрены некоторые их недостатки, разработана компактная и бюджетная автономная метеостанция на базе Arduino, где для хранения и визуализации данных используется веб-приложение (библиотеки Arduino Ethernet). В работе [17] представлена разработка IoT АМС с использованием Arduino Uno, сопровождаемая графическим прикладным программным обеспечением.

Пользователи, которые не полагаются на бюджетные решения, но при этом не располагают средствами на приобретение профессиональных, выбирают АМС из средней ценовой категории (от 80 до 400 тыс. руб.), к которой можно отнести различные модели АМС (например, Davis MeteoBot и Сокол-М). Данные АМС оснащены более профессиональными датчиками, беспроводным модулем для отправки данных в интернет в приложение или веб-сайт соответствующей компании, более гибкими настройками для установки времени опроса и контроля технического состояния АМС. Недостатками является ограниченная автономность в связи с отсутствием энергоэффективных систем питания от солнечной энергии (малая мощность заряда в отличие от АМС высокой ценовой категории), заводская градуировка датчиков (отсутствие лабораторной калибровки/поверки) и ограниченный функционал по расширению возможностей сбора данных (ограниченный ассортимент дополнительных датчиков для подключения, дополнительные затраты).

АМС высокой ценовой категории, стоимость которых может составлять несколько миллионов рублей, применяются для задач климатологической и синоптической, авиационной метеорологии, гидрологии суши и моря, метеорологического обеспечения автомобильных дорог, в экологическом мониторинге и агрометеорологии. Отечественные предприятия, осуществляющие разработку и изготовление систем метеомониторинга: НПО «Тайфун», ИМКЭС СО РАН,

ООО «Сибаналитприбор». Популярными зарубежными профессиональными коммерческими системами являются: MAWS201 и WXT520 (Vaisala, Финляндия), CSAT3 (Campbell Scientific, Inc., США) и MaxiMet Compact Weather Station (Gill Instruments, Великобритания), Delta-T Devices GP2 (Великобритания), Cimel (Франция)[4]. Такие системы оснащены набором откалиброванных, прошедших поверку высокоточных датчиков с более рациональным (распределенным) их расположением на штанге, монополе, а также системой сбора данных, эффективной системой подзарядки аккумулятора.

В отдельную категорию профессиональных АМС можно выделить специальные решения для особых условий функционирования, например, в отечественной АМС «АрктикМетео»[5], разработанной в ИМКЭС СО РАН и предназначенной для работы на удаленных и труднодоступных территориях со сложными климатическими условиями. АМС обладает вандалозащищенной конфигурацией и включает в себя две метеостанции, расположенные на высоте 2 и 10 м. Таким образом обеспечивается сбор метеоданных с десятков каналов измерения. Сигналы с датчиков, измеряющих метеорологические величины, поступают в систему сбора, усвоения и передачи данных, которая пакетирует их соответствующим образом и передает на хранение на внешний сервер по кабельному каналу, каналам сотовой и спутниковой связи. Автономность работы АМС (до одного года) обеспечивается комбинированной системой электропитания, состоящей из аккумуляторов, солнечных панелей и генератора на топливных элементах (метанол).

Одной из проблем в 2024 г. стало существенное увеличение стоимости АМС в условиях санкций, например, метеостанции средней ценовой категории Davis в европейских интернет-магазинах можно приобрести менее чем за 100 тыс. руб., при этом в России средняя цена начинается от 160 тыс. руб., более оснащенные варианты стоят более 300 тыс. руб., а MeteoBot – метеостанция болгарского производства – имеет стоимость около 350 тыс. руб. АМС MeteoBot осуществляет мониторинг следующих параметров: температура и влажность воздуха, атмосферное давление, количество выпавших осадков, солнечная радиация, скорость ветра, точка росы, температура почвы. Автономность повышается за счет подзарядки аккумулятора солнечной панелью. Передача данных происходит через интернет с помощью встроенного LTE-модуля. Одной из главных трудностей является доступ к данным с серверов, расположенных за пределами Российской Федерации и потенциальным риском их отключения [18].

Отображение данных метеонаблюдений

Важным аспектом использования АМС в современных системах дистанционного сбора данных являются различные методы преобразования и отображения получаемых данных. Например, в работе ученых Научно-исследовательского

[4] Современный агрометеорологический комплекс КАМК / В. А. Корольков [и др.]; Тихомиров А. А. Разработка и создание измерительно-вычислительной системы для реализации технологии мезомасштабного мониторинга и прогнозирования состояния атмосферного пограничного слоя. Госконтракт № 14.607.21.0030. Министерство науки и высшего образования РФ. 2014–2016. https://elibrary.ru/gblqou

[5] Тихомиров А. А. Разработка и создание измерительно-вычислительной системы для реализации технологии мезомасштабного мониторинга и прогнозирования состояния атмосферного пограничного слоя. Госконтракт № 14.607.21.0030.

института сельского хозяйства Крыма приводится описание системы мониторинга и дистанционного управления теплицей, для чего было разработано веб-приложение, которое позволило визуализировать собранные данные (температуру окружающей среды, влажность почвы, относительную влажность и освещение), получить доступ к настройке и управлению климатическими условиями[6]. Что касается программной части систем сбора данных, то используются различные подходы к отображению данных [18–20]. IoT-система мониторинга условий окружающей среды на сельскохозяйственных полях на основе Raspberry Pi [21] использовалась для обнаружения признаков дыма или пламени в режиме реального времени, данные транслировались в веб-приложение на сервер и отображались на интернет-сайте, веб-интерфейс которого разработан с использованием Flask, HTML и CSS для безопасной визуализации данных обнаружения в режиме реального времени.

В современных технологиях отображения данных метеонаблюдений часто используются веб-приложения, которые могут работать на любом устройстве, где установлен веб-браузер, и обработка выполняется с использованием аппарата математической статистики или машинного обучения [1; 15; 20]. Пользователю необходимо предоставить эргономичный интерфейс для отображения собранных данных и статистики. Традиционно для такой задачи используют 2D графики. Как правило, для каждого канала измерения АМС должен выводится свой график, где на оси абсцисс откладывается время, а по оси ординат – мгновенные или усредненные показания датчика за отведенный период (15 мин, 1 ч и т. д.). Обработанные данные могут отображаться на сайте в табличном виде с возможностью скачать набор данных, например, в формате Microsoft Excel.

Для АМС из низкой ценовой категории не предусмотрена отправка данных на определенные веб-сервисы самостоятельно и требуется подключение к дополнительным аппаратным средствам (ПК или логгерам), для обработки и анализа информации используются сторонние программы (Excel, R и др.).

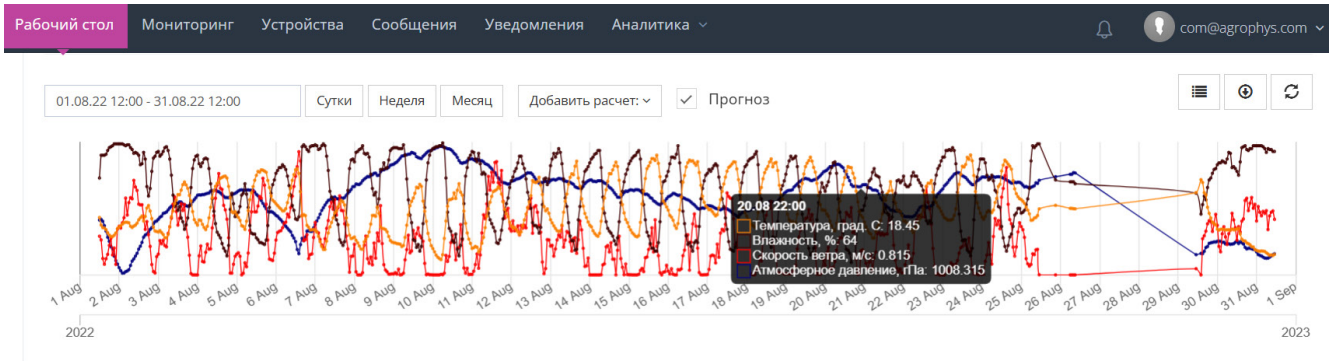
АМС из средней и высокой ценовой категорий обычно предоставляют доступ к данным через веб-сервисы, например, отечественный веб-сервис[7] и зарубежное приложение[8] [22], позволяющие видеть и загружать данные о динамике метеоусловий за выбранный период. Для примера презентационного отображения данных на рисунке 1 представлен дашборд сайта АМС «Сокол-М»[9], которая использовалась на Меньковской опытной станции в 2022–2023 гг. (доступ к личному кабинету на сайте предоставляется при покупке хотя бы одного комплекта АМС). Сайт предоставлял данные в графическом (верхняя половина скриншота) и табличном виде (нижнее половина скриншота) за указанный период, предоставлялась возможность выбора конкретных метеопараметров на графиках (в данном случае температура и влажность воздуха, скорость ветра, давление).

[6] Волков А. С., Фролов Ф. В., Дунаева Е. А. Рынок метеостанций: особенности, достоинства и недостатки существующих моделей // Неделя науки ИСИ : сб. материалов Всеросс. конф. (1–4 апреля 2024 г., г. Санкт-Петербург). СПб. : Издательство Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, 2024. С. 333–336. https://elibrary.ru/tntvvp

[7] Sokol Meteo : веб-сервис. URL: https://sokolmeteo.com/login (дата обращения: 21.10.2024).

[8] Meteobot : веб-сервис. URL: https://meteobot.com/ru/ (дата обращения: 21.10.2024).

[9] Sokol Meteo : веб-сервис.



METEO-2 (данные получены: 21.10.2023 04:47:36)

01.08.22 12:00 - 31.08.22 12:00 | Сутки | Неделя | Месяц | Прогноз

Date	EVS	UVI	UV	TRR	TR2	t	WD	WM	RN	PR1	WV2	HM	WV	RSSI	PR	UV2	KS	ang2	ang1	L
31.08.22 11:00	2	8449	4.45	-	-	9.63	25	7.3	0	748.6911	-	95	1.88	31	998.175	0.0445	0	-	-	3063
31.08.22 10:00	-	5813.5	3.75	-	-	9.37	39.5	8.39	0	748.5899	-	95	2.165	31	998.04	0.0375	0	-	-	2660
31.08.22 09:00	-	4368	2.6	-	-	9.52	35	7.7	0	748.4436	-	96	2.12	31	997.845	0.026	0	-	-	1854
31.08.22 08:00	4096	1890.5	1.45	-	-	9.395	35.5	7.695	0	748.3086	-	96	1.995	31	997.665	0.0145	0	-	-	1001

Р и с. 1. Интерфейс веб-сайта метеостанции «Сокол-М» на Меньковской опытной станции

F i g. 1. Web-site of the Sokol-M weather station at the Menkovo experimental station

Источник: снимок сделан в личном кабинете на сайте метеостанции «Сокол-М» (https://sokolmeteo.com).
Source: the photo was taken in the personal account on the Sokol-M weather station website (https://sokolmeteo.com).

Сельхозпроизводителями применяются комплексные решения не только по визуализации, но и с использованием моделей прогнозирования. Исследователями и программистами из Греции разработано веб-приложение, поддерживающее инновационные методы управления орошением в масштабах хозяйства на средиземноморском острове Крит[10]. Фронтэнд (frontend – презентационная часть информационной или программной системы, ее пользовательский интерфейс) веб-приложения представляет собой интегрированную в HTML-страницу GIS, где пользователь может выбрать сельскохозяйственный объект на карте, после чего предоставляется функционал проведения расчетов с помощью модели продуктивности AquaCrop для предсказания урожайности и получения информации по управлению агротехнологиями на вегетационный период. Веб-приложение, представленное в данной статье, в дальнейшем планируется интегрировать в веб-платформу, которая позволит осуществить прогнозирование урожайности с помощью системы имитационного моделирования продукционного процесса сельскохозяйственных культур AGROTOOL [23; 24].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

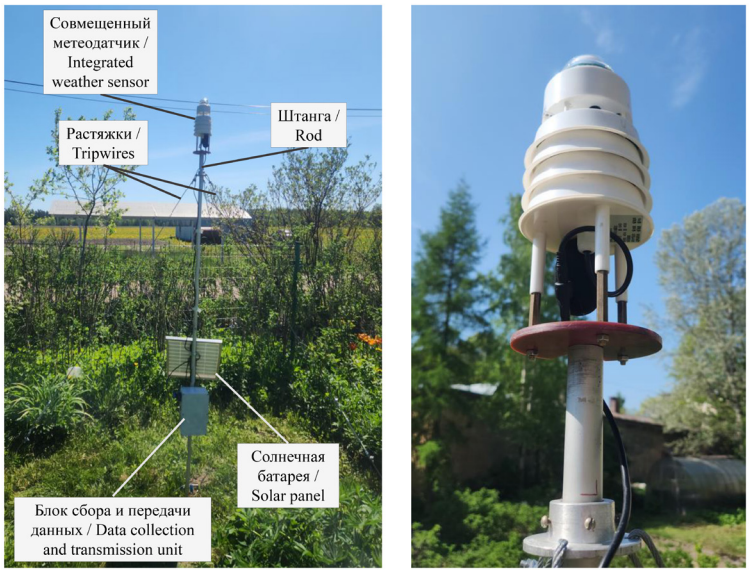
Оборудование, методы и процедура исследований

С учетом результатов полевых испытаний беспроводной сенсорной сети[11] [25], являющейся основным компонентом IoT-системы, была разработана новая конфигурация экспериментальной бюджетной АМС, представленной на рисунке 2, входящей в состав IoT-системы. Система построена по модульному принципу. Все элементы АМС были установлены на штанге, которая фиксировалась растяжками с анкерами для повышения ветроустойчивости конструкции. Нижний конец штанги заглублялся в почву на глубину 50 см. На верхнем конце штанги на высоте 2 м располагался совмещенный метеодатчик CWT-UWD (Small Ultrasonic Integrated Weather Station) производителя ComWinTop (Китай). На расстоянии около 50 см от земли на штанге размещается блок питания, обработки и передачи данных, имеющий следующие составляющие: микрокомпьютер Raspberry Pi Zero, преобразователь интерфейса USB-RS-485, 4G модем, модуль тока и напряжения INA219; контроллер Pi Pico с RTC модулем и реле; аккумулятор, контроллер заряда. С обратной стороны на штанге располагалась солнечная панель, ориентированная на юг.

Затраты на приобретение комплектующих для экспериментального образца IoT АМС подтверждают, что данное решение является бюджетным. В таблице приведены цены основных элементов системы (актуально на начало 2025 г.).

[10] Meteobot : мобильное приложение [Электронный ресурс] : сайт. URL: https://meteobot.com/ru/softuer/mobilnoe-prilozhenie/ (дата обращения: 21.10.2024).

[11] Блохин Ю. И., Белов А. В., Блохина С. Ю. Беспроводная гибридная сеть с поддержкой интернета вещей (IoT) для мониторинга посевов сельскохозяйственных культур // Биологизация землепользования: почва, технологии, продукция : материалы Междунар. науч.-практ. конф. (28–31 августа 2023 г., г, Москва). М : Постер-М, 2023. С. 328–333. https://elibrary.ru/coqiyg



Р и с. 2. Внешний вид экспериментального образца IoT автоматической метеостанции на опытном поле

F i g. 2. External view of the IoT automated weather station engineering prototype on the experimental field

Источник: фотографии сделаны Ю. И. Блохиным при полевых испытаниях рядом с Меньковской опытной станцией (20.05.2024 г.).

Source: the photos were taken during the field test by Yu. I. Blokhin near in Menkovo station 20.05.2024.

Т а б л и ц а

T a b l e

Стоимость основных компонентов IoT автоматической метеостанции

Cost of the main components of the IoT automated weather station

Компонент / Component	Цена, руб. / Price, RUB
Совмещенный метеодатчик CWT-UWD / Combined weather sensor	24 617
Raspberry Pi Zero W	1 764
Pi Pico Board RP2040	282
Преобразователь интерфейса USB-RS-485 / Interface converter USB-RS-485	232
Модуль часов RTC DS3231 / Clock module RTC DS3231	153
Модуль тока и напряжения INA219 / Current and voltage module INA219	89
Релейный модуль / Relay module	100
Импульсный стабилизатор напряжения SCV0026-5V-2A / Pulse voltage stabilizer SCV0026-5V-2A	790
4G модем Huawei E3372h / 4G modem Huawei E3372h	3 932
Аккумулятор Delta Battery DT 1207 / Battery Delta Battery DT 1207	1 861
Контроллер заряда Delta PWM 2410 / Charge controller Delta PWM 2410	1 260
Солнечная батарея Delta SM 15-12 P / Solar battery Delta SM 15-12 P	2 060
Корпус для РЭА G3008 240×160×90 мм / Frame for REA G3008 240×160×90 mm	1 930
Труба алюминиевая длина 2 500 мм / Aluminum pipe length 2 500 mm	1 500
Кабели, кнопки, разъемы, такелаж, анкера и другие расходные материалы / Cables, buttons, connectors, rigging, anchors and other consumables	3 000
Итого / Total	33 820

Совмещенный метеодатчик имеет ряд преимуществ относительно стандартных датчиков и традиционного метода размещения датчиков на метеостанциях[12] [18]. Необходимо отметить, что отдельные датчики нуждаются в разнесенной установке и, как правило, отдаляются от геометрического центра метеостанции на определенное расстояние, чтобы не перекрывать друг друга для воздушного потока (учет скорости и направления ветра). При этом преимуществом разнесенной установки является возможность демонтировать отдельные датчики для настройки, калибровки или замены, что трудно выполнимо для совмещенного датчика, так как замена отдельных элементов таких систем, как правило, не предусмотрена.

Расположение элементов в совмещенном датчике выполнено таким образом, чтобы каждый отдельный датчик не оказывал воздействия на другие датчики. Совмещенный датчик значительно упрощает подключение к системе сбора данных АМС, уменьшает общую ветровую нагрузку на конструкцию АМС за счет меньшего профиля, а отсутствие выносных элементов и механических датчиков значительно упрощает хранение системы и размещение в полевых условиях, повышается удобство работы с данными, получаемыми в едином формате, что упрощает их преобразование. Используется единая цепь питания, в которой отсутствуют отдельные DC-DC преобразователи и стабилизаторы напряжения на каждый датчик. Для учета направления и скорости ветра используется ультразвуковой модуль, в конструкции которого отсутствуют механические вращающиеся элементы, что должно обеспечивать работу системы при обледенении. Вместо традиционного механического осадкомера с ведром и воронкой для учета осадков используется оптический дождемер. Разработки оптических дождемеров были начаты в нашей стране в 1990-х гг.[13], но долгое время на рынке отсутствовали доступные бюджетные решения. Диапазон и точность измерения CWT-UWD, заявленые изготовоителем: температура –40...+80 °C ± 0,5 °C, относительная влажность 0...99 % ± 3 %, атмосферное давление 0...130 кПа ± 0,15 кПа, скорость ветра 0...40 м/с ± 0,5 + 2 %, направление ветра 0...359° ± 3°, освещенность 0...200 000 Люкс ± 7 %, осадки 0...24 мм/мин ± 5 %.

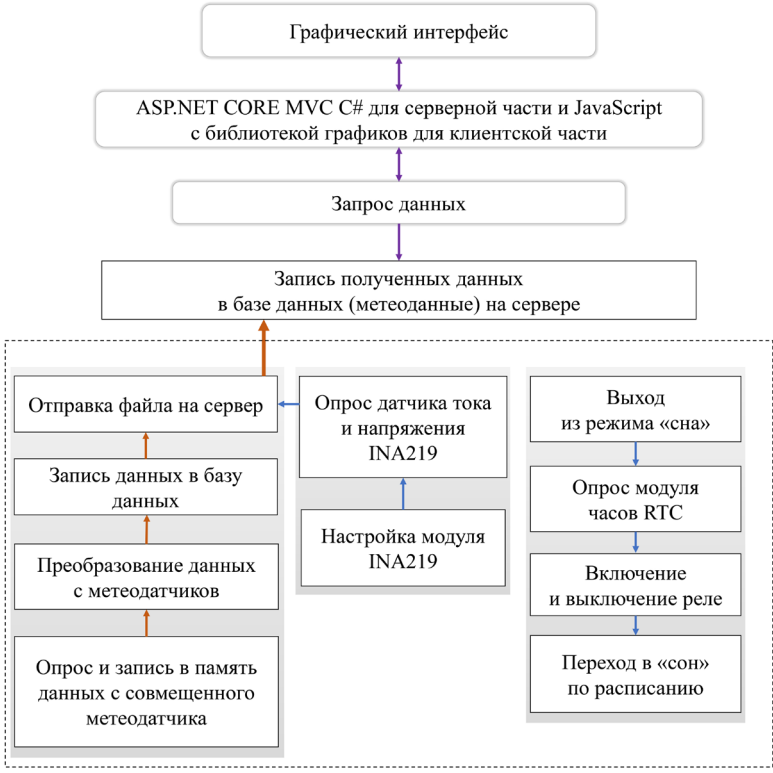
Для разработки набора приложений, анализа кода, рефакторинга на Java и microPython использвались IDE (интегрированная среда разработки) – IntelliJ IDEA 2022 и PyCharm 2022 соотвественно, сборка Java-проекта для АМС осуществлялась с использованием фреймворка Apache Maven. Программное обеспечение на Java для Pi Zero обеспечивает опрос совмещенного метеодатчика, подключение и запись показаний записи в локальную и удаленную систему управления базами данных PostgreSQL через интернет. Дублирование данных в локальную базу данных производится для сохранения данных на случай неудачного интернет соединения с сервером в связи с негативными погодными условиями. Программное обеспечение на microPython для контроллера Pi Pico обеспечивает периодический переход в режим сна всех компонентов АМС, кроме совмещенного датчика. Алгоритм работы АМС (рис. 3) реализует выход системы

[12] Тихомиров А. А. Разработка и создание измерительно-вычислительной системы для реализации технологии мезомасштабного мониторинга и прогнозирования состояния атмосферного пограничного слоя. Госконтракт № 14.607.21.0030.

[13] Современный агрометеорологический комплекс КАМК / В. А. Корольков [и др.].

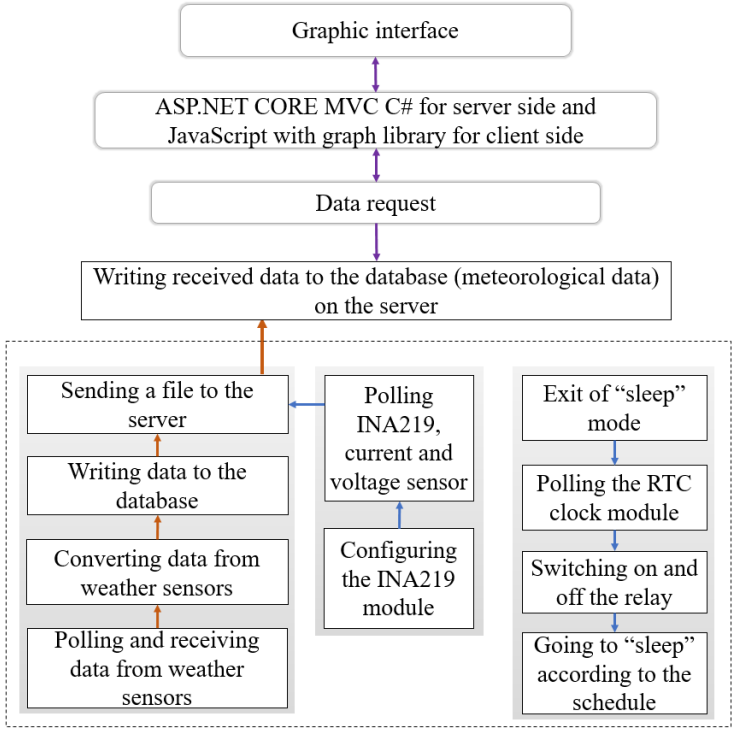
из режима сна по расписанию: включение реле, две минуты ожидания для загрузки операционной системы, создание стабильного интернет-канала передачи данных, опрос всех каналов совмещенного методатчика, опрос датчика тока и напряжения, преобразование данных, подключение к удаленной базе данных на сервере, завершение работы операционной системы, выключение реле после трех минут работы и уход в режим сна на 27 минут.

Для записи данных АМС использовалась база данных IoT-системы [26], в структуру которой была интегрирована таблица meteo1. В таблицу meteo1 поступали данные с сомещенного методатчика АМС и модуля INA219. Структура таблицы agro_log: id – автоматически присваиваемый порядковый номер в базе данных; reg_date – время и дата записи; wind_speed – скорость ветра, м/с; wind_direction – направление ветра (0–360°); humidity – относительная влажность воздуха, %; temperature – температура воздуха, С°; atmospheric_pressure – атмосферное давление, Па; the_lux_value – освещенность, Люкс; optical_rainfall – осадки, мм; voltage – напряжение аккумулятора, В; current – сила тока на выходе аккумулятора, А. Метод подключений к базе данных будет описан далее в рамках описания кода веб-приложения.



Р и с. 3. Архитектура программно-аппаратного комплекса с веб-интерфейсом отображения данных мониторинга локальных метеоусловий

Источник: рисунок составлен авторами статьи.



F i g. 3. Architecture of hardware-software complex with web interface for local meteorological conditions monitoring data

Source: the diagram is compiled by the authors of the article.

Дополнительным преимуществом использования Raspberry Pi Zero и операционной системы Raspberry Pi OS[14] являются широкие возможности логгирования процессов, выполняемых в операционной системе, что важно для выявления причин ошибок на этапе прототипирования аппаратных и программных компонентов АМС.

Представленная конфигурация обеспечивает стабильную работу системы в полевых условиях, высокую стабильность сбора и передачи данных на удаленный сервер, поддержание достаточного для функционирования системы уровня заряда аккумулятора.

Разработка веб-интерфейса

Веб-интерфейс должен обеспечивать пользователю доступ к просмотру и использованию данных АМС, записанных в базу данных. Для этого необходимо создать клиент-серверную архитектуру, где на стороне сервера будут обрабатываться и храниться данные, а на стороне клиента данные будут представляться.

[14] Raspberry Pi Operating System [Электронный ресурс] : сайт. URL: https://www.raspberrypi.com/software/ (дата обращения: 21.10.2024).

Приложения для доступа, просмотра и использования данных АМС, записанных в базу данных, можно разрабатывать с помощью архитектурного паттерна MVC (model – view – controller) или же с помощью технологии REST (Representational State Transfer). Веб-приложения, запрограммированные при помощи архитектурного стиля REST API, представляют собой следующую структуру: запрограммированный веб-сервер предоставляет прикладной пользовательский интерфейс (API), через который клиентская часть посредством HTTP-запросов (GET, POST) обращается к веб-серверу. Таким образом в веб-сервисе абстрагировано друг от друга создаются серверная и клиентская части, связь между которыми происходит через REST API. С другой стороны, существует иной подход к созданию веб-приложений – MVC, где модель, представление и контроллер располагаются в едином контуре веб-сервера.

Выбор графики ApexCharts

Разработку системы было решено реализовывать с помощью паттерна MVC. Мотивация выбора платформы ASP.NET Core MVC обусловлена сравнением с аналогичными технологиями, предоставляющими инструменты для разработки веб-сервиса. Самыми распространенными на сегодняшний день технологиями для программирования веб-серверов являются PHP и Node.js. Для взаимосвязи кода и базы данных выбрана технология Entity Framework Core.

Отображение графиков функций было решено реализовывать с помощью сторонних JavaScript-библиотек, так как такие библиотеки предоставляют «из коробки» возможности интерактивного взаимодействия с ними (увеличение размера, анимационные переходы при перерисовке графика, генерация системы координат на графике). Выбор разработчика остановился на библиотеке под названием ApexCharts[15]. Отличительной особенностью данной библиотеки стала более подробная и наглядная документация, по сравнению с конкурентами, а также наличие поддержки от разработчиков ASP.NET Core MVC.

Код работы веб-приложения

Исходный код приложения находится в открытом доступе[16]. При разработке архитектуры приложения использовался паттерн проектирования внедрения зависимостей, суть которого заключается во внедрении интерфейса между взаимодействием класса модели и контроллера обработки данных. Например, чтобы реализовать отображение данных метеостанции в графическом интерфейсе сначала необходимо создать объект «репозиторий» и строку подключения к базе данных, чтобы передавать из базы в репозиторий сами данные.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Графический интерфейс веб-приложения

При разработке графического пользовательского интерфейса веб-сервиса была использована технология адаптивной верстки. Адаптивная верстка – это создание страниц сайта, которые автоматически подстраиваются под разрешение

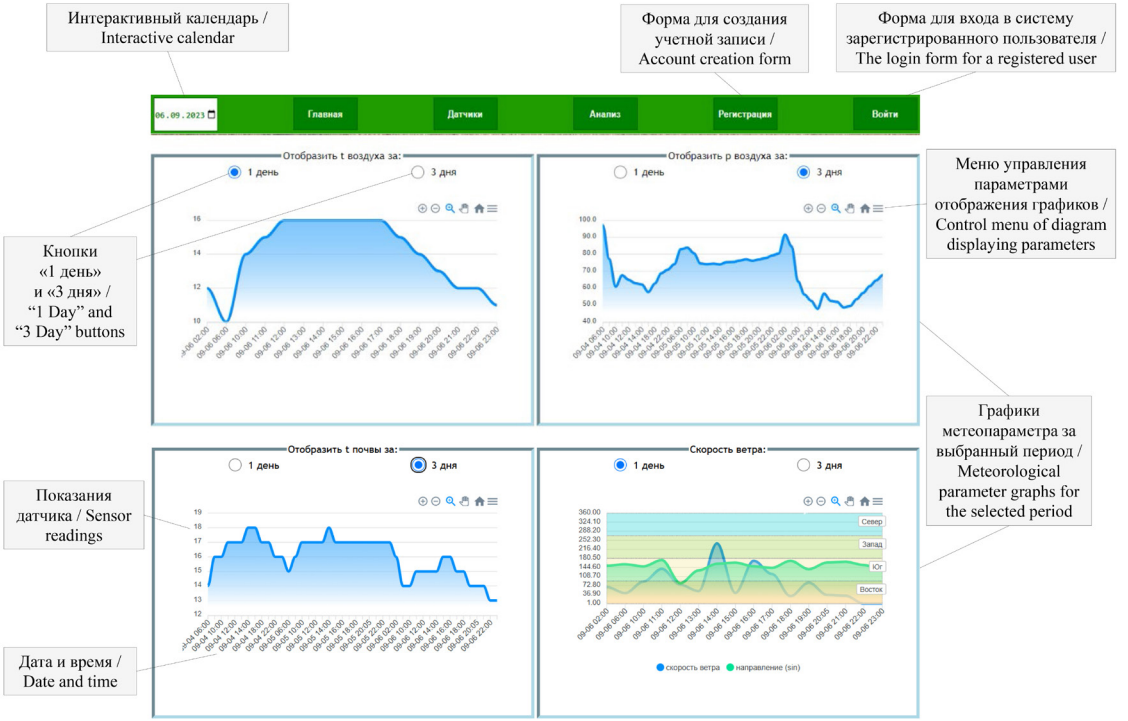
[15] APEXCHARTS.JS Modern & Interactive Open-source Charts [Электронный ресурс] : сайт. URL: https://apexcharts.com/ (дата обращения: 21.10.2024).

[16] Ari-Metiostation. Visualisation Soil and Weather Information from Menkovo Field, St. Petersburg Region [Электронный ресурс] : сайт. URL: https://github.com/kradunches/ari-metiostation (дата обращения: 21.10.2024).

экрана устройства. Веб-интерфейс (рис. 4) разрабатывался для трех разрешений: компьютерной (ширина страницы 1 200 пикселей), планшетной (ширина страницы 768 пикселей) и мобильной (ширина страницы 320 пикселей). Благодаря такому подходу, пользователь сможет зайти на портал с любого устройства, на котором установлен веб-браузер и присутствует доступ в интернет.

Данный функционал реализован с помощью чистого JavaScript. Если на компьютере пользователя не поддерживается JavaScript, кнопка открытия меню не будет отображаться, так как переключение между состояниями не работает. В этом случае меню находится в потоке документа (открытое меню не будет накладываться поверх остальных элементов), а все элементы сайта будут видны, как и пункты меню.

Графический пользовательский интерфейс веб-приложения взаимодействует с содержимым с помощью JavaScript. В верху страницы находится шапка сайта, где располагаются вкладки «Главная», «Датчики», «Анализ», «Регистрация», «Войти» и календарь. В нижней части главной страницы сайта находится «подвал», где содержится информация о контактах с разработчиками. В левом верхнем углу, в «шапке», находится интерактивный HTML-элемент типа календарь. Пользователь может выбрать дату в календаре, за которую необходимо отобразить динамику метаданных на веб-сайте (по умолчанию выбран текущий день). На вкладке «Главная» отображается информация о влажности и температуре воздуха, освещенности, атмосферном давлении, количестве осадков, скорости и направлении ветра. Данные параметров представлены в графическом и табличном виде. На графиках реализованы две кнопки, осуществляющее масштабирование данных по времени. При нажатии на кнопку «1 день» информация о выбранном параметре будет отображаться за выбранный на календаре день, при нажати на кнопку «3 дня» информация о выбранном параметре будет отображаться за два предыдущих и за текущий день. На вкладке «Датчики» реализовано представление данных, получаемых IoT-системой [14] в графическом и табличном виде. На вкладке «Анализ» пользователю предоставлена возможность провести однофакторный дисперсионный анализ данных. В текстовую форму необходимо загрузить данные в формате CSV, с разделителем запятая, и при нажатии на кнопку «Анализ» программа предоставит результат проведения однофакторного дисперсионного анализа в виде числовых метрик, где наиболее интересными для пользователя являются фактическое значение Фишера и p-уровень значимости. На вкладке «Регистрация» присутствует форма для создания учетной записи в информационной системе. Имя пользователя и пароль хранятся в базе данных, при этом пароль зашифрован. На вкладке «Войти» зарегистрированный пользователь может авторизоваться в системе. Для зарегистрированных и утвержденных пользователей появляется возможность скачать накопленные данные в формате Exel-таблицы. В дальнейшем планируется добавить возможность верификации новых пользователей с помощью электронной почты.



Дата	*°C почвы*	*Вт/м²*	*лк*	*°C воздух*	*рад*	*м/с*
2023-09-06 02:00	16	0,512	91,6	12	129,0	67,0
2023-09-06 06:00	14	0,512	84,7	10	134,1	42,0
2023-09-06 10:00	14	0,514	63,9	14	126,6	88,0
2023-09-06 11:00	15,0	0,514	56,2	15	148,5	139,0

Таблица метеопараметров за выбранный период / Table of meteorological parameters for the selected period

Р и с. 4. Главная страница веб-приложения
F i g. 4. Home page of the web application

Источник: снимок сделан в веб-приложении AFIpole.
Source: snapshot is taken in web application AFIpole.

Полевые испытания автоматической метеостанции

Для проведения натурных испытаний IoT АМС была размещена 23 мая в Меньковском филиале АФИ вблизи экспериментального поля № 24 (59.419743, 30.031941), на этом же полигоне располагалась беспроводная сенсорная сеть, входящая в состав IoT-системы[17] [14]. При проведении испытаний IoT АМС датчики каждые 30 мин измеряли фактические значения метеовеличин, которые поступали в базу данных сервера. IoT АМС и веб-приложение в 2024 г. обеспечили высокую производительность, минимизацию задержек при негативных условиях внешней среды (сильный дождь, ветер, низкие и высокие температуры), стабильное наполнение базы данных и отображение графиков метеоусловий на сайте. Всего за вегетационный период с 23 мая за 138 дней работы получено 5 111 строк записи (кортежей) в удаленную базу данных и 5 484 в локальную, что говорит о потере около 7 % данных при передаче. В среднем за один день работы IoT АМС поступало около 40 записей – достаточное количество для работы веб-приложения. С 13 по 24 июля АМС не функционировала по причине выхода из строя модуля преобразователя интерфейса, после выявления проблемы и замены модуля АМС продолжила работать в штатном режиме.

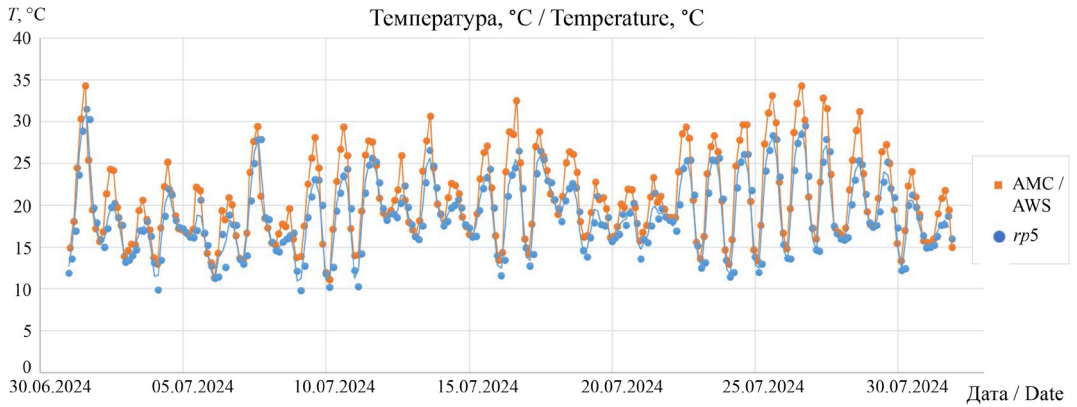
Для оценки достоверности полученных данных информация о состоянии окружающей среды, собранная IoT АМС, сравнивалась с данными метеостанции ОГМС Белогорка (Гатчинский р-н, Ленинградская обл.), данные с которой находятся в открытом доступе[18]. Метеостанция в Белогорке расположена на расстоянии 10 км от Меньково. При сравнении наборов данных температуры окружающей среды установлено, что нагрев корпуса влияет на показания датчика IoT АМС, разница в показаниях составляла в среднем 1–4 °C, что явно превышает погрешность, заявленную производителями датчика (рис. 5).

При сопоставлении данных о количестве осадков за июль можно предположить, что показания IoT АМС являются достоверными, так как осадки фиксировались двумя системами в одни и те же или смежные дни. Наблюдаемые различия по количеству осадков можно объяснить территориальным расположением метеостанций, однако отмечался пробел в показаниях IoT АМС с 19 по 21 июля (рис. 6), что позволяет сделать вывод о невысокой надежности оптических датчиков данного ценового сегмента. Неизвестно, как производителем датчиков учтены погрешности, связанные с малым диаметром чувствительного элемента, с ветровым недоучетом и разбрызгиванием капель о края корпуса прибора, которые критически влияют на точность измерения интегральных характеристик осадков.

При сравнении наборов данных скорости ветра нужно учесть, что датчик АМС находился на высоте 2 м от поверхности земли, а датчик метостанции в Белогорке на высоте 10–12 м над поверхностью земли, а данные собирались за десятиминутный период раз в 3 ч. Наблюдалась схожая динамика показаний (постепенное нарастание скорости ветра) 1 и 7 июля, когда в Гатчинском районе был зафиксирован сильный ветер, поваливший часть деревьев и вызвавший обрыв линий электропередачи (рис. 7).

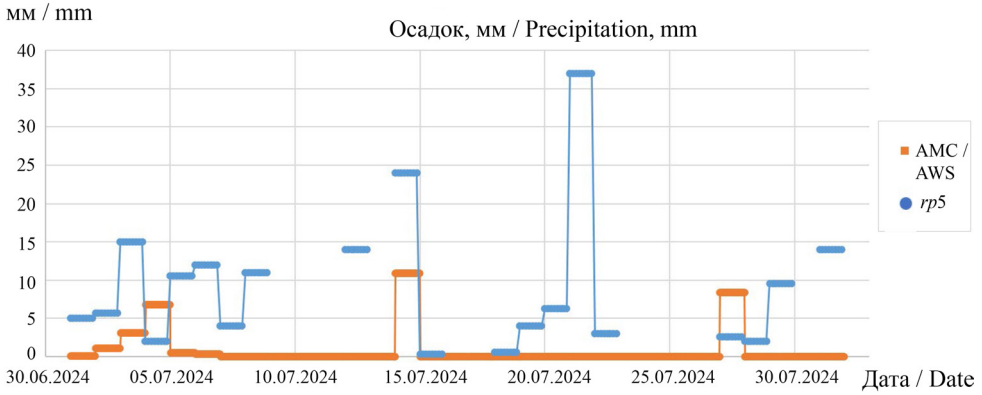
[17] Блохин Ю. И., Белов А. В., Блохина С. Ю. Беспроводная гибридная сеть с поддержкой интернета вещей (IoT) для мониторинга посевов сельскохозяйственных культур.

[18] Архив погоды в Белогорке [Электронный ресурс] : сайт. URL: https://clck.ru/3NxvQ6 (дата обращения: 21.10.2024).



Р и с. 5. Динамика температуры воздуха по данным автоматической метеостанции и открытого источника
F i g. 5. Air temperature dynamics from automated weather station and open source data

Источник: графики для рисунков 5–8 составлены авторами статьи.
Source: the diagrams for figures 5–8 are compiled by the authors of the article.



Р и с. 6. Динамика выпадения осадков по данным автоматической метеостанции и открытого источника
F i g. 6. Precipitation dynamics according to automated weather station and open source data

На рисунке 8 представлен график изменения напряжения аккумулятора IoT АМС. Отмечаются три случая просадки напряжения аккумулятора 23.08.2024, 3.09.2024 и 25.09.2024 в связи с негативным влиянием факторов окружающей среды, вызвавшим падение напряжения до установленной минимальной отметки 11 В из-за сильной облачности и проливных дождей, что видно по показаниям датчика освещенности. При этом напряжение аккумулятора за счет подзарядки от солнечной панели возвращалось к нормальному (более 12 В) уже на следующий день.

В целом, по результатам полевых испытаний в 2024 г. можно сделать вывод о высокой надежности аппартных и программных решений, использованых в экспериментальном образце IoT АМС, но при этом о низкой точности показаний некоторых датчиков, что вызывает необходимось градуировки совмещенного датчика в лабораторных условиях, или замены совмещенного датчика на классические механические датчики с разнесенной установкой.

Для представления преимуществ предлагаемого прототипа относительно аналогов проведен SWOT-анализ.

Сильные стороны: 1) программно-аппаратный комплекс обладает инструментарием, позволяющим агроному оценивать изменения климатических условий в режиме реального времени; 2) по сравнению с анализом данных, полученных вручную, трудоемкость работы сокращается на 80 %; 3) сбор данных с периодичностью в 30 мин обеспечивает непрерывный поток информации для аналитики и прогнозов, открытая аппаратная архитектура обеспечивает автономность за счет подзарядки аккумулятора от солнечной батареи и алгоритма режима сна.

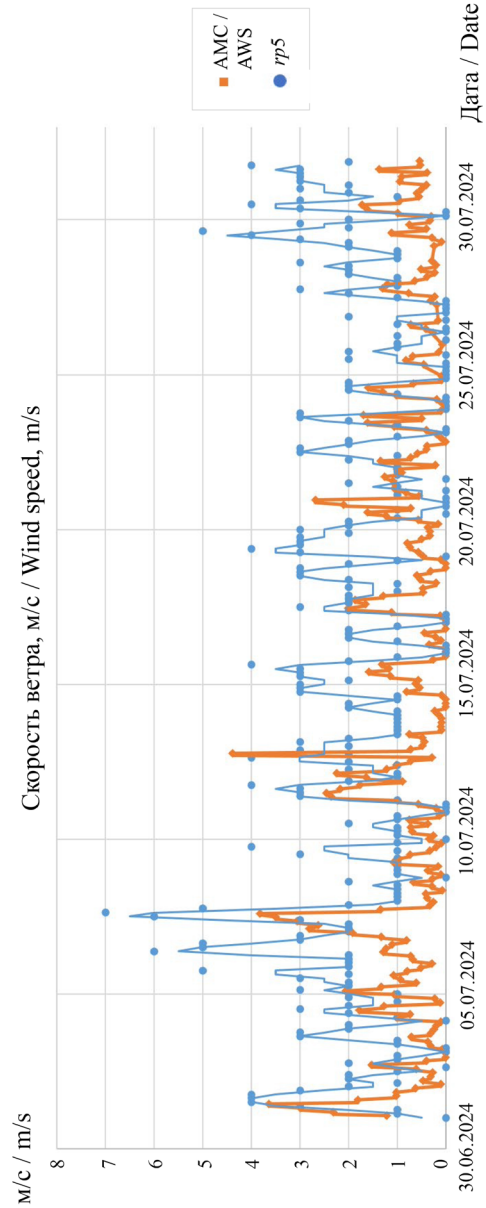
Слабые стороны: 1) относительно низкая точность показаний совмещенного датчика метеоусловий; 2) отсутствие поверки в отечественных метрологических службах; 3) отсутствие информации о дрейфе показаний датчиков со временем; 4) недостаточная морозостойкость блоков обработки и передачи данных IoT АМС; 5) необходимость программной поддержки; 6) необходимость периодического обслуживания АМС (например, в случае загрязнения солнечной батареи).

Угрозы и риски: 1) теоретические возможные проблемы с доступностью компонентов; 2) нестабильность цен в связи с курсом; 3) остановка выпуска используемого совмещенного датчика; 4) уязвимость ко взломам, так как сервис доступен в сети интернет.

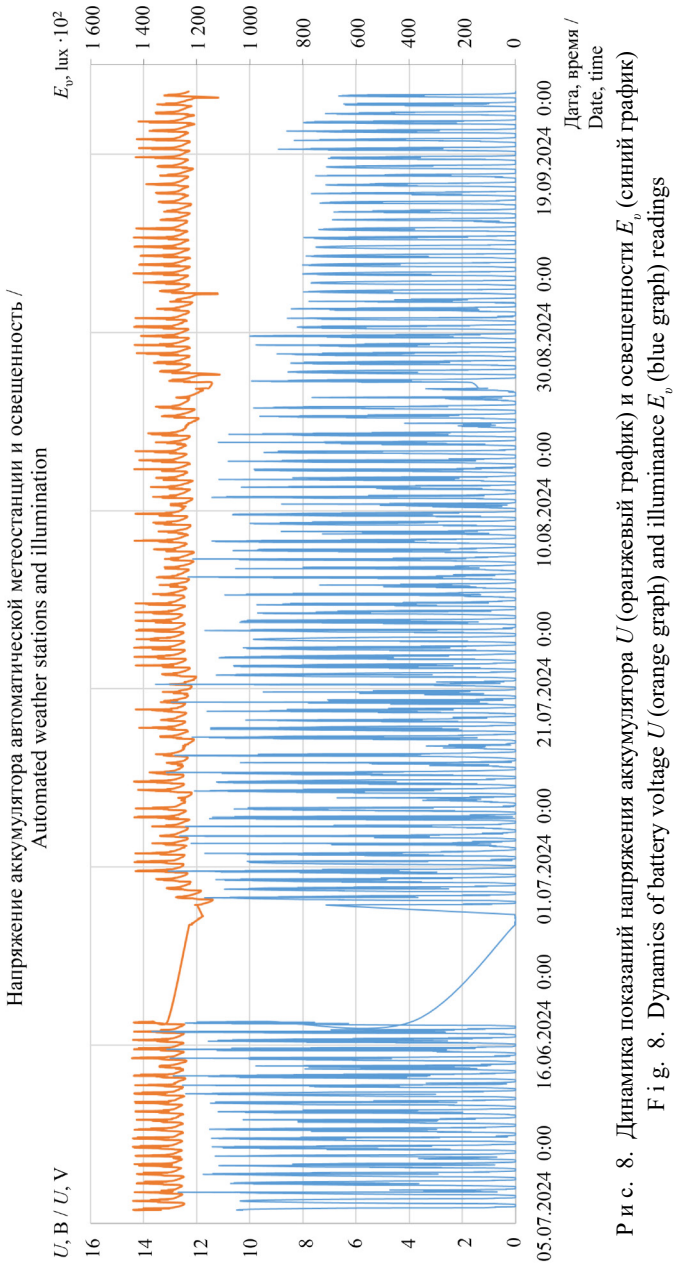
Возможности: 1) калибровка показаний АМС; 2) замена совмещенного метеодатчика на аналогичный или профессиональный с незначительным изменением аппаратной и программной платформы; 3) расширение сети автономных устройств для сбора данных; 4) архитектура программного кода построена таким образом, что систему удобно масштабировать и добавлять новый функционал; 5) в систему планируется добавить интерфейс для работы с динамическими моделями продукционного процесса, а также новые метеостанции и полевые датчики.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Интеграция веб-технологий в агропромышленный комплекс является перспективной задачей, которая предоставит исследователям и агрономам современные методы мониторинга состояния окружающей среды. Проведен обзор АМС разных ценовых категорий и рассмотрены веб-сервисы отображения данных.



Р и с. 7. Динамика скорости ветра по данным автоматической метеостанции и открытого источника
F i g. 7. Wind speed dynamics from automated weather station and open source data



Р и с. 8. Динамика показаний напряжения аккумулятора U (оранжевый график) и освещенности $E_υ$ (синий график)

F i g. 8. Dynamics of battery voltage U (orange graph) and illuminance $E_υ$ (blue graph) readings

Представлен экспериментальный образец бюджетной АМС (IoT АМС), разработанной для получения данных о локальных метеоусловиях в течении вегетационного периода на опытных полях Меньковского филиала АФИ.

Проведен обзор технологий, позволяющих реализовать программный веб-сервер. Разработано и развернуто веб-приложение на аппаратном сервере, представлены ключевые блоки кода с пояснениями, описан алгоритм развертывания веб-сайта в интернете. Разработан фронтэнд веб-приложения для наглядной визуализации данных IoT АМС. Веб-приложение реализовано на языке C# с использованием технологии ASP.NET CORE MVC C# для серверной части и JavaScript с библиотекой графиков для клиентской части.

В 2024 г. с 23 мая за 138 дней работы было получено 5 111 строк (кортежей) записи в удаленную базу данных и 5 484 в локальную. Результаты полевых испытаний IoT АМС и веб-приложения показали высокую производительность системы, минимизацию задержек при негативных условиях внешней среды (сильный дождь, ветер, низкие и высокие температуры), стабильное наполнение базы данных и отображение графиков метеоусловий на сайте. Разработанная IoT АМС, построенная по модульному принципу, с совмещенным метеодатчиком является более компактной и бюджетной в сравнении с готовыми решениями, существующими на рынке. Непрерывный поток информации, открытая аппаратная архитектура обеспечивает автономность системы за счет подзарядки аккумулятора от солнечной батареи и алгоритма режима сна.

Перспективы дальнейшего исследования: 1) разработать приложение для мобильных устройств; 2) дополнить веб-приложение системой уведомлений о возникновении негативных погодных эффектов (сильное повышение температуры, скорости ветра), которая позволит своевременно сообщить пользователю о сложившейся ситуации для корректировки полевых работ; 3) провести градуировку совмещенного датчика в лабораторных условиях для повышения точности показаний, или заменить совмещенный датчик на классические механические датчики с незначительным изменением аппаратной и программной платформы; 4) для работы с динамическими моделями продукционного процесса в систему планируется добавить интерфейс и полевые датчики.

При положительных показателях работы в полевых условиях IoT АМС и веб-приложения с увеличением их функционала планируется сборка подобных станций для создания сети мониторинга климатических данных с возможностью их реализации для нужд сельского хозяйства, тем самым спрос на метеоданные сельхозтоваропроизводителей будет удовлетворяться.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chamara N., Islam, Md D., Bai G., Shi Ye., Ge Yu. Ag-IoT for Crop and Environment Monitoring: Past, Present, and Future. *Agricultural Systems.* 2022;203:103497. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103497
2. Adli H.K., Remli M.A., Wan Salihin Wong K.N.S., Ismail N.A., González-Briones A., Corchado J.M., Mohamad M.S. Recent Advancements and Challenges of AIoT Application in Smart Agriculture: A Review. *Sensors.* 2023;23(7):3752. https://doi.org/10.3390/s23073752

3. Quy V.K., Hau N.V., Anh D.V., Quy N.M., Ban N.T., Lanza S., Randazzo G., Muzirafuti A. IoT-Enabled Smart Agriculture: Architecture, Applications, and Challenges. *Applied Sciences.* 2022;12(7):3396. https://doi.org/10.3390/app12073396
4. Placidi P., Morbidelli R., Fortunati D., Papini N., Gobbi F., Scorzoni A. Monitoring Soil and Ambient Parameters in the IoT Precision Agriculture Scenario: An Original Modeling Approach Dedicated to Low-Cost Soil Water Content Sensors. *Sensors.* 2021;21(15):5110. https://doi.org/10.3390/s21155110
5. Narayana T.L., Venkatesh C., Kiran A., Babu J C., Kumar A., Khan S.B., et al. Advances in Real Time Smart Monitoring of Environmental Parameters Using Iot and Sensors. *Heliyon.* 2024;10(7):e28195. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28195
6. Shahab H., Naeem M., Iqbal M., Aqeel M., Ullah S.S. Iot-Driven Smart Agricultural Technology for Real-Time Soil and Crop Optimization. *Smart Agricultural Technology.* 2025;10:100847. https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.100847
7. Chawngsangpuii R. Using IoT for Smart Weather Station. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research.* 2019;6(1):15–19. URL: https://www.jetir.org/papers/JETIR1901E04.pdf (дата обращения: 21.09.2024).
8. Dayananda L.P.S.S.K., Narmilan A., Pirapuraj P. An IoT Based Low-Cost Weather Monitoring System For Smart Farming. *Agricultural Science Digest.* 2022;42(4):393–399. https://doi.org/10.18805/ag.D-370
9. Desai V., Shevade N., Nigal K., Narkhede M., SonuneT., Londhe T., et al. IoT-Based Smart Weather Station Using ESP32 for Real-Time Environmental Monitoring. *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology.* 2025;5(1):491–501. https://doi.org/10.48175/IJARSCT-24870
10. Ali H., Farooque A.A., Abbas F., Yaqub R., Abdalla A., Soora P. An IoT Based Weather Monitoring System for Smart Agriculture. In: IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech) (14–17 April 2024). Portland, OR, USA, 2024:378–382. https://doi.org/10.1109/SusTech60925.2024.10553425
11. Morais R., Mendes J., Silva R., Silva N., Sousa J., Peres E. A Versatile, Low-Power and Low-Cost IoT Device for Field Data Gathering in Precision Agriculture Practices. *Agriculture.* 2021;11(7):619. https://doi.org/10.3390/agriculture11070619
12. Duguma A.L., Bai X. How the Internet of Things Technology Improves Agricultural Efficienc. *Artificial Intelligence Review.* 2025;58:63. https://doi.org/10.1007/s10462-024-11046-0
13. Miller T., Mikiciuk G., Durlik I., Mikiciuk M., Łobodzińska A., Śnieg M. The IoT and AI in Agriculture: The Time Is Now – A Systematic Review of Smart Sensing Technologies. *Sensors.* 2025;25(12):3583. https://doi.org/10.3390/s25123583
14. Ncube M.M., Ngulube P. Enhancing Environmental Decision-Making: A Systematic Review of Data Analytics Applications in Monitoring and Management. *Discover Sustainability.* 2024;5:290. https://doi.org/10.1007/s43621-024-00510-0
15. Ganesan S., Lean C.P., Li C., Yuan K.F., Kiat N.P., Khan M.R.B. IoT-enabled Smart Weather Stations: Innovations, Challenges, and Future Directions. *Malaysian Journal of Science and Advanced Technology.* 2024;4(2):180–190. https://doi.org/10.56532/mjsat.v4i2.293
16. Вечерков В.В., Абдураимов С.Р., Дунаева Е.А. Разработка комплексной агрометеостанции, основанной на микроконтроллере Arduino. *Известия сельскохозяйственной науки Тавриды.* 2023;(33):105–114. https://elibrary.ru/nvobpm
17. Bella H.K.D., Naidu M.S., Digumarti J., Khan M. Developing a Sustainable IoT-Based Smart Weather Station for Real Time Weather Monitoring and Forecasting. In: 15th International Conference on Materials Processing and Characterization, E3S Web of Conferences. 2023:430. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202343001092
18. Тихомиров А.А., Корольков В.А., Смирнов С.В., Азбукин А.А., Богушевич А.Я., Кальчихин В.В., и др. Метеорологические наблюдения и их приборное обеспечение в ИМКЭС СО РАН. *Оптика атмосферы и океана.* 2022;35(2):122–131. https://doi.org/10.15372/AOO20220206

19. Algarín R.C., Cabarcas C.J., Llanos P.A. Low-Cost Fuzzy Logic Control for Greenhouse Environments with Web Monitoring. *Electronics.* 2017;6(4):71. https://doi.org/10.3390/electronics6040071
20. Kushagra S., Shivandu S.K. Integrating Artificial Intelligence and Internet of Things (IoT) for Enhanced Crop Monitoring and Management in Precision Agriculture. *Sensors International.* 2024;5:100292. https://doi.org/10.1016/j.sintl.2024.100292
21. Rathor A.S., Choudhury S., Sharma A., Nautiyal P., Shah G. Empowering Vertical Farming Through IoT and AI-Driven Technologies: A Comprehensive Review. *Heliyon.* 2024;10(15):e34998. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34998
22. Morchid A., Jebabra R., Ismail A., Khalid H.M., Alami R., Qjidaa H., et al. IoT-Enabled Fire Detection for Sustainable Agriculture: A Real-Time System Using Flask and Embedded Technologies. *Results in Engineering.* 2024;23:102705. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102705
23. Vilas M.P., Thorburn P.J., Fielke S., Webster T., Mooij M., Biggs J.S., et al. 1622WQ: A Web-Based Application to Increase Farmer Awareness of the Impact of Agriculture on Water Quality. *Environmental Modelling & Software.* 2020;132:104816. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104816
24. Badenko V., Topaj A., Medvedev S., Zakharova E., Dunaeva I. Estimation of Agro-Landscape Productivity in Regional Scale Using Dynamic Crop Models in a GIS-Environment. *Landscape Modelling and Decision Support.* 2020:545–565. https://doi.org/10.1007/978-3-030-37421-1_28
25. Медведев С.А., Черяев А.С. Перспективы создания универсального сервиса удаленных ансамблевых расчетов динамических моделей продукционного процесса культурных растений. *Агрофизика*. 2020;(3):45–52. https://doi.org/10.25695/AGRPH.2020.03.07
26. Blokhin Yu.I., Blokhina S.Yu. Wireless Hybrid Sensor Network for Agriculture Monitoring. In: IX International Scientific Conference on Agricultural Science 2024 “Current State, Problems and Prospects for the Development of Agricultural Science” (AGRICULTURAL SCIENCE 2024). 2024;141:02025. https://doi.org/10.1051/bioconf/202414102025

Об авторах:

Блохин Юрий Игоревич, научный сотрудник отдела управления агротехнологиями и агромониторингом Агрофизического научно-исследовательского института (195220, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Гражданский пр., д. 14), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2863-2734, Researcher ID: C-6221-2017, Scopus ID: 57210640448, SPIN-код: 3472-9517, blohin3k4@gmail.com

Черяев Александр Сергеевич, студент 1 курса магистратуры по направлению «Веб-технологии» Университета ИТМО (197101, Российская Федерация, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49А), техник-программист отдела управления агротехнологиями и агромониторингом Агрофизического научно-исследовательского института (195220, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Гражданский пр., д. 14), ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9892-4196, sasha10131310@gmail.com

Блохина Светлана Юрьевна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник отдела управления агротехнологиями и агромониторингом Агрофизического научно-исследовательского института (195220, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Гражданский пр., д. 14), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0173-2380, Researcher ID: C-3152-2017, Scopus ID: 7003956389, SPIN-код: 4861-6030, syublokhina@gmail.com

Вклад авторов:

Ю. И. Блохин – формулирование идеи исследования, целей и задач; осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение полевых экспериментов, сбор и анализ экспериментальных данных; создание и подготовка рукописи: критический анализ черновика рукописи, внесение замечаний и исправлений членами исследовательской группы, в том числе на этапах до и после публикации.

А. С. Черяев – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов, сбор и анализ экспериментальных данных; создание и подготовка рукописи: написание черновика рукописи.

С. Ю. Блохина – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов, сбор и анализ экспериментальных данных; создание и подготовка рукописи: написание черновика рукописи, включая его перевод на иностранный язык.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила в редакцию 24.12.2024; поступила после рецензирования 04.02.2025; принята к публикации 20.02.2025

REFERENCES

1. Chamara N., Islam, Md D., Bai G., Shi Ye., Ge Yu. Ag-IoT for Crop and Environment Monitoring: Past, Present, and Future. *Agricultural Systems.* 2022;203:103497. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103497
2. Adli H.K., Remli M.A., Wan SalihinWong K.N.S., Ismail N.A., González-Briones A., Corchado J.M., Mohamad M.S. Recent Advancements and Challenges of AIoT Application in Smart Agriculture: A Review. *Sensors*. 2023; 23:3752. https://doi.org/10.3390/s23073752
3. Quy V.K., Hau N.V., Anh D.V., Quy N.M., Ban N.T., Lanza S., Randazzo G., Muzirafuti A. IoT-Enabled Smart Agriculture: Architecture, Applications, and Challenges. *Applied Sciences.* 2022;12(7):3396. https://doi.org/10.3390/app12073396
4. Placidi P., Morbidelli R., Fortunati D., Papini N., Gobbi F., Scorzoni A. Monitoring Soil and Ambient Parameters in the IoT Precision Agriculture Scenario: An Original Modeling Approach Dedicated to Low-Cost Soil Water Content Sensors. *Sensors.* 2021;21(15):5110. https://doi.org/10.3390/s21155110
5. Narayana T.L., Venkatesh C., Kiran A., Babu J C., Kumar A., Khan S.B., et al. Advances in Real Time Smart Monitoring of Environmental Parameters Using Iot and Sensors. *Heliyon.* 2024;10(7):e28195. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28195
6. Shahab H., Naeem M., Iqbal M., Aqeel M., Ullah S.S. Iot-Driven Smart Agricultural Technology for Real-Time Soil and Crop Optimization. *Smart Agricultural Technology.* 2025;10:100847. https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.100847
7. Chawngsangpuii R. Using IoT for Smart Weather Station. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research.* 2019;6(1):15–19. Available at: https://www.jetir.org/papers/JETIR1901E04.pdf (accessed 21.09.2024).
8. Dayananda L.P.S.S.K., Narmilan A., Pirapuraj P. An IoT Based Low-Cost Weather Monitoring System For Smart Farming. *Agricultural Science Digest.* 2022;42(4):393–399. https://doi.org/10.18805/ag.D-370
9. Desai V., Shevade N., Nigal K., Narkhede M., SonuneT., Londhe T., et al. IoT-Based Smart Weather Station Using ESP32 for Real-Time Environmental Monitoring. *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology.* 2025;5(1):491–501. https://doi.org/10.48175/IJARSCT-24870
10. Ali H., Farooque A.A., Abbas F., Yaqub R., Abdalla A., Soora P. An IoT Based Weather Monitoring System for Smart Agriculture. In: IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech) (14–17 April 2024). Portland, OR, USA, 2024:378–382. https://doi.org/10.1109/SusTech60925.2024.10553425
11. Morais R., Mendes J., Silva R., Silva N., Sousa J., Peres E. A Versatile, Low-Power and Low-Cost IoT Device for Field Data Gathering in Precision Agriculture Practices. *Agriculture.* 2021;11(7):619. https://doi.org/10.3390/agriculture11070619

12. Duguma A.L., Bai X. How the Internet of Things Technology Improves Agricultural Efficienc. *Artificial Intelligence Review.* 2025;58:63. https://doi.org/10.1007/s10462-024-11046-0
13. Miller T., Mikiciuk G., Durlik I., Mikiciuk M., Łobodzińska A., Śnieg M. The IoT and AI in Agriculture: The Time Is Now – A Systematic Review of Smart Sensing Technologies. *Sensors.* 2025;25(12):3583. https://doi.org/10.3390/s25123583
14. Ncube M.M., Ngulube P. Enhancing Environmental Decision-Making: A Systematic Review of Data Analytics Applications in Monitoring and Management. *Discover Sustainability.* 2024;5:290. https://doi.org/10.1007/s43621-024-00510-0
15. Ganesan S., Lean C.P., Li C., Yuan K.F., Kiat N.P., Khan M.R.B. IoT-enabled Smart Weather Stations: Innovations, Challenges, and Future Directions. *Malaysian Journal of Science and Advanced Technology.* 2024;4(2):180–190. https://doi.org/10.56532/mjsat.v4i2.293
16. Vecherkov V.V., Abduraimov S.R., Dunaieva Ie.A. Development of Complex Agrometeo Station Based on Arduino Microcontroller. *Transactions of Taurida Agricultural Science*. 2023;(33):105–114. (In Russ., abstract in Eng.) https://elibrary.ru/nvobpm
17. Bella H.K.D., Naidu M.S., Digumarti J., Khan M. Developing a Sustainable IoT-Based Smart Weather Station for Real Time Weather Monitoring and Forecasting. In: 15th International Conference on Materials Processing and Characterization, E3S Web of Conferences. 2023:430. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202343001092
18. Tikhomirov A.A., Korolkov V.A., Smirnov S.V., Azbukin A.A., Bogushevich A.Ya., Kalchikhin V.V., et al. Meteorological Observations and Instrumentation at IMCES SB RAS. *Optika Atmosfery i Okeana*. 2022;35(2):122–131. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.15372/AOO20220206
19. Algarín R.C., Cabarcas C.J., Llanos P.A. Low-Cost Fuzzy Logic Control for Greenhouse Environments with Web Monitoring. *Electronics.* 2017;6(4):71. https://doi.org/10.3390/electronics6040071
20. Kushagra S., Shivandu S.K. Integrating Artificial Intelligence and Internet of Things (IoT) for Enhanced Crop Monitoring and Management in Precision Agriculture. *Sensors International.* 2024;5:100292. https://doi.org/10.1016/j.sintl.2024.100292
21. Rathor A.S., Choudhury S., Sharma A., Nautiyal P., Shah G. Empowering Vertical Farming Through IoT and AI-Driven Technologies: A Comprehensive Review. *Heliyon.* 2024;10(15):e34998. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34998
22. Morchid A., Jebabra R., Ismail A., Khalid H.M., Alami R., Qjidaa H., et al. IoT-Enabled Fire Detection for Sustainable Agriculture: A Real-Time System Using Flask and Embedded Technologies. *Results in Engineering.* 2024;23:102705. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102705
23. Vilas M.P., Thorburn P.J., Fielke S., Webster T., Mooij M., Biggs J.S., et al. 1622WQ: A Web-Based Application to Increase Farmer Awareness of the Impact of Agriculture on Water Quality. *Environmental Modelling & Software.* 2020;132:104816. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104816
24. Badenko V., Topaj A., Medvedev S., Zakharova E., Dunaeva I. Estimation of Agro-Landscape Productivity in Regional Scale Using Dynamic Crop Models in a GIS-Environment. *Landscape Modelling and Decision Support.* 2020:545–565. https://doi.org/10.1007/978-3-030-37421-1_28
25. Medvedev S.A., Cherayev A.S. Prospects for Creating Universal Service for Remote Ensemble Calculations of Dynamic Models of Cultivated Plant Production Process. *Agrophysica*. 2020;(3):45–52. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.25695/AGRPH.2020.03.07
26. Blokhin Yu.I., Blokhina S.Yu. Wireless Hybrid Sensor Network for Agriculture Monitoring. In: IX International Scientific Conference on Agricultural Science 2024 “Current State, Problems and Prospects for the Development of Agricultural Science” (AGRICULTURAL SCIENCE 2024). 2024;141:02025. https://doi.org/10.1051/bioconf/202414102025

About the authors:

Yuri I. Blokhin, Researcher of the Department of Agrotechnology and Agromonitoring Management, Agrophysical Research Institute (14 Grazhdansky Ave., 195220 St. Petersburg, Russian Federation), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2863-2734, Researcher ID: C-6221-2017, Scopus ID: 57210640448, SPIN-code: 3472-9517, blohin3k4@gmail.com

Alexander S. Cheryaev, First Course Master's Degree Student of Web-Technology Program of PECT (Program Engineering and Computer Technique) Faculty, ITMO University (49A Kronverkskiy Ave., St. Petersburg 197101, Russian Federation), Technician-Programmer of the Department of Agrotechnology and Agromonitoring Management, Agrophysical Research Institute (14 Grazhdansky Ave., 195220 St. Petersburg, Russian Federation), ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9892-4196, sasha10131310@gmail.com

Svetlana Yu. Blokhina, Cand.Sci. (Biol.), Senior Researcher of the Department of Agrotechnology and Agromonitoring Management, Agrophysical Research Institute (14 Grazhdansky Ave., 195220 St. Petersburg, Russian Federation), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0173-2380, Researcher ID: C-3152-2017, Scopus ID: 7003956389, SPIN-code: 4861-6030, syublokhina@gmail.com

Authors contribution:

Yu. I. Blokhin – formulating the study idea, aims and objectives; conducting the study process, specifically performing the field experiments, collecting and analyzing experimental data; preparing the article manuscript: critical analysis of the manuscript, comments and corrections made by the members of the research group during the pre-publication and post-publication stages.

A. S. Cheryaev – conducting the study, specifically performing the field experiments, collecting and analyzing experimental data; preparing the article manuscript specifically writing the initial manuscript version.

S. Yu. Blokhina – conducting the study, specifically performing the field experiments, collecting and analyzing experimental data; preparing the manuscript, specifically writing the initial manuscript version (including its translation into the English language).

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 24.12.2024; revised 04.02.2025; accepted 20.02.2025

https://vestnik.mrsu.ru ISSN 2658-4123, eISSN 2658-6525

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ / TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT

https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202503.443-464
EDN: https://elibrary.ru/uqawjb
УДК 633.11:631.559

Оригинальная статья / Original article

Интеллектуальная оценка урожайности пшеницы по вариабельному потенциалу семян

С. П. Пронин[1] ✉, **А. Г. Зрюмова**[1], **А. А. Пилецкий**[1], **В. И. Беляев**[2]
[1] *Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова, г. Барнаул, Российская Федерация*
[2] *Алтайский государственный аграрный университет, г. Барнаул, Российская Федерация*
✉ *spponin@mail.ru*

Аннотация

Введение. Оценка качества семян пшеницы является неотъемлемой частью технологического процесса ее производства, поскольку она влияет на повышение урожайности. На урожайность влияет множество различных факторов, поэтому методы оценки постоянно совершенствуются с учетом новых факторов, физических методов и технических средств. В настоящее время быстро развиваются методы интеллектуальной оценки посевного качества семян и посевов. Электрофизический метод позволяет оценить влияние почвы на семена по вариабельному потенциалу.
Цель исследования. Изучить изменения вариабельного потенциала у семян пшеницы с известной урожайностью при набухании семян в растворах с различным соотношением калия к натрию; создать сверточную нейронную сеть для оценки потенциальной урожайности по вариабельному потенциалу и известным соотношениям калия к натрию.
Материалы и методы. Для исследований использовались семена двух сортов яровой пшеницы с различной урожайностью. Для имитации качества почвы применялись растворы с различными соотношениями концентраций хлористого калия и хлористого натрия. Для измерения вариабельного потенциала использовалось устройство, созданное на основе платы сбора данных ЛА50-USB. Для оценки урожайности применялось вейвлет-преобразование и глубокая сверточная нейронная сеть с группами ResNet.
Результаты исследования. Получены экспериментальные графики изменения вариабельного потенциала в зависимости от соотношения калия к натрию в растворе, имитирующем качество почвы. С помощью нейронной сети выполнена классификация потенциальной урожайности семян пшеницы по вейвлет-преобразованиям вариабельного потенциала и соотношениям калия к натрию. Составлена таблица ответов нейронной сети на тестовые вариабельные потенциалы.
Обсуждение и заключение. Выполнено сравнение полученных графиков изменения вариабельного потенциала от изменения калия во внешней среде с результатами исследований других авторов. Результаты качественно совпадают. Разработанная

© Пронин С. П., Зрюмова А. Г., Пилецкий А. А., Беляев В. И., 2025

Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

нейронная сеть способна классифицировать потенциальную урожайность семян пшеницы по вариабельному потенциалу и соотношениям калия к натрию. Выполненные исследования полезны для сельскохозяйственных предприятий и фермеров. Предложенная оценка потенциальной урожайности по вариабельному потенциалу и водной вытяжке позволит оптимизировать процесс внесения калия в почву для конкретных семян пшеницы.

Ключевые слова: вариабельный потенциал, пшеница, соотношение калия к натрию, нейронная сеть, урожайность

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Пронин С.П., Зрюмова А.Г., Пилецкий А.А., Беляев В.И. Интеллектуальная оценка урожайности пшеницы по вариабельному потенциалу семян. *Инженерные технологии и системы.* 2025;35(3):443–464. https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202503.443-464

Intelligent Assessment of Wheat Yield through the Variable Potential of Seeds

S. P. Pronin[a] ✉, **A. G. Zryumova**[a], **A. A. Piletsky**[a], **V. I. Belyaev**[b]
[a] *Polzunov Altai State Technical University*, *Barnaul*, *Russian Federation*
[b] *Altai State Agricultural University*, *Barnaul*, *Russian Federation*
✉ *spponin@mail.ru*

Abstract

Introduction. Evaluation of wheat seed quality is an integral part of the technological process of its production since it increases the yield. The yield is affected by many different factors. The evaluation methods are constantly being improved taking into account new factors, physical methods and technical means. Currently seeds and crops sowing quality intelligent evaluation methods are developing very rapidly. The electrophysical method allows evaluating the soil influence on seeds by the variable potential.

Aim of the Study. The study is aimed at examining changes in the variable potential of wheat seeds of a known crop yields during seed swelling in solutions with different potassium and sodium ratios and creating a convolutional neural network to estimate potential crop yields through the variable potential and known potassium and sodium ratios.

Materials and Methods. The studies were carried out using seeds of two varieties of spring wheat with different yields. To simulate soil quality, there were used solutions with different potassium chloride and sodium chloride ratios. The variable potential was measured using a device based on the data acquisition board LA50-USB. The yield was estimated using wavelet transform and deep convolutional neural network with ResNet groups.

Results. There have been developed the experimental graphs of the variable potential change depending on the potassium and sodium ratio in a solution simulating soil quality. The neural network was used to classify the potential yield of wheat seeds through wavelet transforms of the variable potential, and potassium and sodium ratios. There has been compiled a table of neural network responses to test variable potentials.

Discussion and Conclusion. The developed graphs of the variable potential change depending on potassium change in the external environment were compared with the results of studies by other authors. The results qualitatively coincide. The developed neural network can classify the potential yield of wheat seeds through the variable potential, and potassium and sodium ratios. The conducted study is useful for agricultural enterprises and farmers. The proposed methodology for assessing potential crop yields through variable potential and water extract will allow optimizing the process of potassium application to the soil.

Keywords: variable potential, wheat, potassium and sodium ratio, neural network, yield

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

For citation: Pronin S.P., Zryumova A.G., Piletsky A.A., Belyaev V.I. Intelligent Assessment of Wheat Yield through the Variable Potential of Seeds. *Engineering Technologies and Systems.*2025;35(3):443–464. https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202503.443-464

ВВЕДЕНИЕ

Оценка качества семян пшеницы является неотъемлемой частью технологического процесса ее производства, поскольку она повышает урожайность. Основные методы и средства оценки в Российской Федерации определены в государственных документах[1]. Перечень методов оценки, применяемых в США, и их описание представлены в Руководстве по ресурсам органических семян[2]. Многие методы оценок, такие как всхожесть, жизнеспособность, совпадают.

Поскольку на урожайность влияет множество различных факторов, методы оценки постоянно совершенствуются с учетом новых факторов, физических методов и технических средств. Например, появление цифровых видеокамер на основе матричных ПЗС-фотоприемников отразилось на совершенствовании методов оценки качества семян по форме, размерам, дефектам, цвету [1–3]. Среди новых физических методов, примененных к исследованиям качества семян пшеницы, выделяются метод терагерцовой спектроскопии во временной области в сочетании со сверточной нейронной сетью [4] и электрофизический метод оценки по вариабельному потенциалу (ВП) [5].

В настоящее время очень быстро развиваются методы интеллектуальной оценки посевного качества семян и посевов [6–8], прогнозирования урожайности пшеницы по оптическим изображениям [9; 10], идентификации семян по сортам для сохранения сортовой чистоты[3] [11; 12].

Перспективным является электрофизический метод оценки качества семян [5], поскольку позволяет прогнозировать потенциальную урожайность. Однако исследования выполнены без учета фактора взаимодействия семян с конкретной почвой. Имитацию влияния почвы на семена пшеницы можно выполнить, например, с помощью растворов солей с различными концентрациями.

Представленная работа посвящена исследованию интеллектуального прогнозирования урожайности пшеницы по вариабельному потенциалу, который возникает на оболочках семян после их замачивания в растворах калия и натрия с различной концентрацией.

[1] ГОСТ 12038-84. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести [Электронный ресурс]. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200023365 (дата обращения: 21.10.2024); ГОСТ Р 52325-2005. Семена сельскохозяйственных растений. Сортовые и посевные качества. Общие технические условия [Электронный ресурс]. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200039547 (дата обращения: 21.10.2024); ГОСТ 9353-2016. Пшеница. Технические условия [Электронный ресурс]. URL: https://clck.ru/3NzcpG (дата обращения: 21.10.2024).

[2] Elias S., Garay A., Gatch E. Seed Quality Testing and Certification: Resources Useful in Organic Seed Production [Электронный ресурс] : сайт. URL: https://eorganic.org/node/394 (дата обращения: 01.12.2024).

[3] HyperLeaf2024 – A Hyperspectral Imaging Dataset for Classification and Regression of Wheat Leaves / W. M. Laprade [et al.] // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) Workshops. 2024. P. 1234–1243. URL: https://clck.ru/3Nzcxg (дата обращения 01.12.2024).

Целью работы является изучение изменения ВП у семян пшеницы с известной урожайностью при набухании семян в растворах с различным соотношением калия к натрию и создание сверточной нейронной сети для оценки потенциальной урожайности по ВП и известным соотношениям K+/Na+.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Судя по количеству публикаций, апробация и развитие новых методов оценки качества семян и посевов осуществляется на основе изображений и сверточных нейронных сетей. По сфере применения эти методы можно классифицировать на несколько групп. Большое их количество посвящено диагностике болезней семян и посевов.

В работах зарубежных и отечественных ученых [1–3] представлена оценка качества семян пшеницы с помощью систем машинного зрения, оснащенных промышленными цифровыми видеокамерами. Эти системы классифицируют семена на больные и здоровые, определяют скрытую дефектность.

Апробация сверточной нейронной сети для классификации семян пшеницы на «плохие» и «хорошие» по внешнему виду представлена в исследовании [6]. Разработанная нейронная сеть способна классифицировать семена по оптическому изображению с точностью 97 %. Метод может быть полезен на этапе оценки посевного качества семян.

Учеными из Индии [13] продемонстрирован метод диагностики болезней посевов пшеницы. Идентификация нескольких заболеваний листьев пшеницы осуществляется с помощью видеокамеры и сверточной нейронной сети.

В статье китайских ученых [7] решается проблема идентификации четырех распространенных вредителей и болезней пшеницы: здоровая, пораженная тлей, пораженная мучнистой росой, пораженная листовой и желтой ржавчиной. Метод идентификации основан на получении изображений и их анализе с помощью улучшенной сверточной нейронной сети.

Аналогичную проблему ранней диагностики болезней пшеницы решают авторы [14]. Диагностика осуществляется по оптическим изображениям с помощью CNN. Для повышения прозрачности и понятности модели обнаружения дефектов были добавлены методы Grad-Cam.

Из приведенного материала следуют выводы. Во-первых, диагностика болезней семян и посевов является важным элементом для принятия обоснованных управленческих решений и прогнозирования потенциальной урожайности. Во-вторых, современные технологии анализа и обработки изображений преимущественно базируются на применении сверточных нейронных сетей. Однако следует отметить существенные ограничения данного подхода – здоровые семена могут демонстрировать низкую урожайность.

Ко второй группе методов, использующих изображения семян и сверточные нейронные сети, можно отнести методы классификации семян по сортам. Эффективная и точная классификация имеет решающее значение для селекции, сохранения сортовой чистоты и снижения восприимчивости к вредителям и болезням, тем самым повышая урожайность.

Турецкие ученые [15] разработали метод идентификации гибридов пшеницы, предназначенный для селекционных программ и управления посевами. Реализация метода осуществляется по оптическому изображению с использованием сверточной нейронной сети (CNN) и метода опорных векторов (SVM).

Исследователями из Китая [11] предложен метод классификации семян пшеницы по сортам. Для реализации метода разработана слабосвязанная групповая сверточная сеть (SCGNet), способная обрабатывать оптические изображения со сложными особенностями поверхностей семян.

Метод идентификации семян пшеницы по сортам представлен в исследовании [12]. Идентификация сортов выполняется по гиперспектральным изображениям с помощью нейронной сети. При обработке изображений используются спектральные, пространственные и текстурные признаки.

Методы классификации семян по сортам тоже косвенным образом отражают урожайность. Привлекает к себе внимание метод, представленный в статье В. Чжан и др. [12]. Применение гиперспектральных изображений увеличивает количество признаков для классификации. Следовательно, увеличивается и достоверность классификации.

Третью группу методов, которые используют изображения и нейронные сети, составляют методы оценки роста пшеницы на этапах колошения и цветения. Подобный метод приведен в статье китайских ученых [8]. Он реализован на сборе и обработке многоспектральных изображений, полученных многоспектральной видеокамерой. Для сбора данных использовался беспилотный летательный аппарат. В обработке информации применялась одномерная сверточная нейронная сеть совместно с моделью дерева решений (1DCNN+DT).

Авторы статьи [9] представили нейронную сеть для обнаружения колосьев пшеницы по полученным изображениям в сложных условиях на сельскохозяйственных угодьях с целью оценки их количества.

Аналогичная задача решается в работе австралийских ученых [10]. В ней приведены результаты оценки урожайности в процессе ее роста в полевых условиях. В основу метода положен расчет плотности колосков по видеоизображениям. Видеокамера устанавливалась на наземной платформе под косым углом. Для анализа полученных изображений применялись четыре сверточные нейронные сети (R–CNN), которые показали точность оценки от 88 до 94 %.

Работа датских авторов[4] посвящена оценке роста и здоровья пшеницы в полевых условиях по гиперспектральным изображениям. В результате исследований получен уникальный набор данных, который состоит из 2 410 гиперспектральных изображений. Каждому изображению соответствуют четыре регрессионных показателя: урожайность (масса зерна), проводимость устьиц (Gsw), флуоресценция хлорофилла (PhiPS2) и удобрение.

Оценка количества и плотности колосков является важным фактором, влияющим на урожайность пшеницы [9]. По сути, новые разработанные методы автоматизируют традиционные, хорошо зарекомендовавшие себя методы подсчета колосков и взвешивания семян, поэтому потенциально могут дать наиболее достоверный

[4] HyperLeaf2024 – A Hyperspectral Imaging Dataset for Classification and Regression of Wheat Leaves / W. M. Laprade [et al.].

прогноз урожайности. Итог прогнозирования зависит от алгоритма обработки и архитектуры нейронной сети.

Четвертая группа методов – методы оценки содержания влаги в озимой пшенице. Зарубежные ученые [16] представили исследования по оценке дефицита воды в озимой пшенице с целью управления орошением. Дистанционный мониторинг осуществляют по гиперспектральному изображению посевов. При интерпретации спектральной информации использована комбинация машинного обучения с вейвлет-анализом.

Аналогичная задача решается исследователями из Китая [17]. На основе гиперспектральных изображений (350−1 350 нм) и данных LWC (периоды формирования, завязывания, цветения и налива) озимой пшеницы предложен мониторинг содержания влаги в почве. Для обработки гиперспектральных данных и оценки LWC применены вейвлет-преобразование, метод дерева решений и искусственная нейронная сеть (ANN).

Как видно из краткого описания методов, задача оценки содержания влаги в озимой пшенице является сложной задачей. Для ее решения авторы значительно увеличивают количество анализируемых признаков. Во-первых, анализируют изображения посева, полученные на различных длинах волн. Во-вторых, с помощью вейвлет-преобразования выделяют существенные признаки в изображениях. В-третьих, в нейронную сеть вводят данные LWC. Вполне вероятно, что дальнейшее развитие этого метода пойдет по пути применения методов цветометрии. Дополнительным признаком в этом случае может стать соотношение цветовых компонентов в гиперспектральных изображениях.

Пятую группу методов можно охарактеризовать как «экспериментальную». В этой группе тоже используют оптические изображения и нейронные сети.

В исследовании А. Е. Малина и др. [18] представлена разработка метода оценки уровня азотного режима растений по оптическим изображениям, полученным с беспилотных летательных аппаратов. Идея, на которой базируется метод оценки, состоит в наложении друг на друга изображений тестовых площадок с разным уровнем обеспеченности азотом. Предложенный алгоритм реализован в сверточной нейронной сети.

Польскими учеными [19] отмечено, что одной из ключевых агротехнических обработок, используемых для зерновых и других культурных растений, определяющих их рост и урожайность, является посев. Важный аспект в посеве − равномерность распределения семян по отдельным рядам. Авторы исследуют скорость движения семян в посевной трубе. Для анализа движений применена система, состоящая из скоростной видеокамеры и многослойного персептрона. Задача персептрона – классифицировать семена по сортам в процессе их движения по трубе.

Метод оценки степени и площади полегания озимой пшеницы приведен в статье Х. Занг и др. [20]. Метод реализован на классификации нейронной сетью MLP_U-Net изображений, полученных с видеокамеры беспилотного летательного аппарата. Полегание пшеницы влияет на ее индивидуальное развитие, а также на общую урожайность и качество. Эта информация необходима для анализа последствий полегания пшеницы и служит ориентиром для определения уровня последствий полегания и выведения улучшенных сортов.

Еще выделяется группа методов, в которых не используются оптические изображения, но применяются нейронные сети. К этой группе относится исследование Р. М. Бисчокова [21], в котором отражена разработка искусственной нейронной сети для непосредственного прогнозирования урожайности озимой пшеницы с учетом климатических характеристик. На входе нейронной сети использовалась сумма активных температур воздуха и сумма осадков за период вегетации, а на выходе – урожайность.

Среди новых методов выделяется электрофизический метод оценки качества семян пшеницы [5]. Метод основан на измерении ВП и обработке данных нейронной сетью. Так, в работе Н. Н. Барышевой [22] с помощью трехслойной нейронной сети была решена задача классификации урожайности четырех сортов пшеницы. В качестве информативных параметров использовались максимальное значение вариабельного потенциала и время нарастания ВП в фазе поляризации. Нейронная сеть способна классифицировать урожайность исследованных семян по указанным электрофизическим свойствам с точностью 96 %. Использование трех признаков из ВП увеличило точность классификации до 98 % [23].

Подводя итоги анализа приведенных источников, можно отметить следующие важные аспекты. Для повышения достоверности диагностики необходимо увеличивать количество анализируемых параметров и сигналов. Несмотря на общую тенденцию развития интеллектуальных методов диагностики качества семян и посевов для прогнозирования урожайности, все рассмотренные подходы имеют существенный недостаток: они не учитывают влияние качества почвы на прогнозируемую урожайность.

Полный перечень показателей почвы содержится в ГОСТ Р 70229-2022[5]. В экспериментальных исследованиях важными являются такие факторы, которые существенно влияют на ВП при посеве семян в почву. Как отмечают С. С. Медведев[6], Е. В. Казак, В. И. Парфенюк [24], ВП формируют, в основном, ионы K^+, Na^+ и Cl^-. Поэтому для имитации качества почвы можно взять растворы с различными соотношениями концентраций хлористого калия и хлористого натрия. После набухания семян пшеницы с известной урожайностью в этих растворах можно зафиксировать их ВП. Зная ВП и соотношения концентраций в растворах, очевидно, можно решать и обратную задачу – определять потенциальную урожайность семян.

Исследования ученых Алтайского государственного технического университета [22; 23] показывают, что с увеличением признаков повышается точность классификации. Поэтому целесообразно к полученному ВП вначале применить вейвлет-преобразование, которое за счет временной фильтрации[7] создает трехмерное «изображение» из двумерного ВП. Таким образом, происходит значительное увеличение количества признаков. Далее обработку полученного «изображения» необходимо предоставить сверточной нейронной сети.

[5] ГОСТ Р 70229-2022. Почвы. Показатели качества почв [Электронный ресурс]. URL: https://clck.ru/3NzdFY (дата обращения: 21.10.2024).

[6] Медведев С. С. Электрофизиология растений : учеб. пособие. СПб. : Изд-во Санкт-Петербургского университета, 1997. 122 с.

[7] Малла С. Вейвлеты в обработке сигналов / пер. с англ. М. : Мир, 2005. 671 с.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

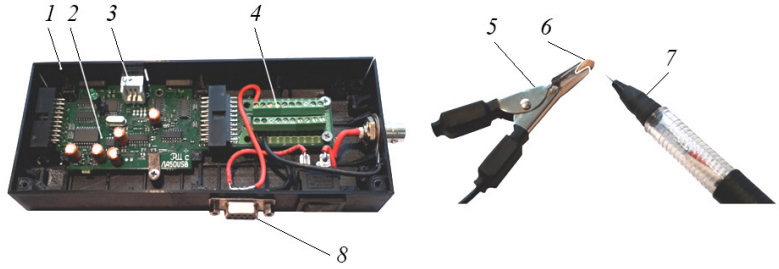
Для исследований использовались семена двух сортов яровой пшеницы с различной комбайновой урожайностью, полученные в СПК «Колос» Романовского района Алтайского края: семена сорта Омская 28, собранные с поля 105 га с урожайностью 25,7 ц/га; семена Омская 28, поле 263 га с урожайностью 39,1 ц/га; семена сорта Буран, поле 117 га с урожайностью 41 ц/га; семена сорта Буран, поле 384 га с урожайностью 50,5 ц/га.

С помощью лабораторного классификатора К-93 семена разделяли на фракции по скорости витания: 8, 9, 10 и 11 м/с. Для исследований применялась фракция 9 м/с. На семенах этой фракции получены характерные зависимости изменения максимального значения ВП (VPmax) и 10%-го времени нарастания от урожайности при набухании семян в дистиллированной воде [5].

Для приготовления растворов использовались медицинская дистиллированная вода, хлорид натрия с концентрацией 9 мг/мл и хлорид калия с концентрацией 40 мг/мл. Приготовленные растворы содержали неизменную концентрацию натрия, равную 15 мг/л, и различные концентрации калия: 0; 0,9; 1,65; 2,4; 3,15; 3,9; 4,65; 5,4 мг/л. В результате получена линейка соотношений ионов K+/Na+: 0,00; 0,06; 0,11; 0,16; 0,21; 0,26; 0,31; 0,36. Диапазон этих соотношений полностью покрывал диапазон соотношений в реальной почве [25].

Перед измерением ВП семена по 11 штук помещали в поролоновые формы с прорезями и замачивали их в приготовленных растворах объемом 5 мл в течение 20 ч при температуре 21°С.

Для измерения ВП использовалось устройство, показанное на рисунке 1.



Р и с. 1. Внешний вид прибора:
1 – корпус прибора; *2* – плата сбора данных ЛА50-USB; *3* – разъем для подключения кабеля USB; *4* – плата переходная для подключения внешних устройств; *5* – отрицательный электрод; *6* – зерно пшеницы, зажатое в электроде; *7* – положительный электрод-игла; *8* – разъем для подключения электродов

F i g. 1. External appearance of the device:
1 – device body; *2* – data collection board LA50-USB; *3* – connector for connecting a USB cable; *4* – adapter board for connecting external devices; *5* – negative electrode; *6* – wheat grain clamped in the electrode; *7* – positive electrode-needle; *8* – connector for connecting electrodes

Источник: рисунки 1, 2, 5 составлены авторами статьи.
Source: figures 1, 2, 5 compiled by the authors of the article.

Для обработки ВП применялись методы статистической оценки данных, искусственной аугментации данных и сверточная нейронная сеть. По своей сути метод аугментации представляет собой размножение первичного ВП [26; 27]. В данной

работе метод использовался дважды. В первый раз при увеличении количества ВП за счет введения гауссовского шума, второй раз – путем вейвлет-преобразования.

На каждое соотношение K+/Na+ и каждую урожайность приходилось по 11 семян пшеницы. Из них ВП 10 семян использовались для обучения нейронной сети, а ВП одного зерна на проверку. Таким образом, при восьми соотношениях K+/Na+ и четырех урожайностях количество исходных ВП составило 352 шт., из которых 320 ВП выделялось на обучение, а 32 ВП на проверку.

Для увеличения ВП каждый из них был размножен до 10 путем введения гауссовского шума с нулевым средним значением и среднеквадратическим отклонением от 9 до 15 мВ. Среднеквадратическое отклонение вычислялось по изменению максимального значения ВП у 11 семян. Таким образом, количество ВП для обучения нейронной сети увеличивалось до 3 200, а проверочных ВП − до 320.

Вейвлет-преобразование было построено на формуле[8]:

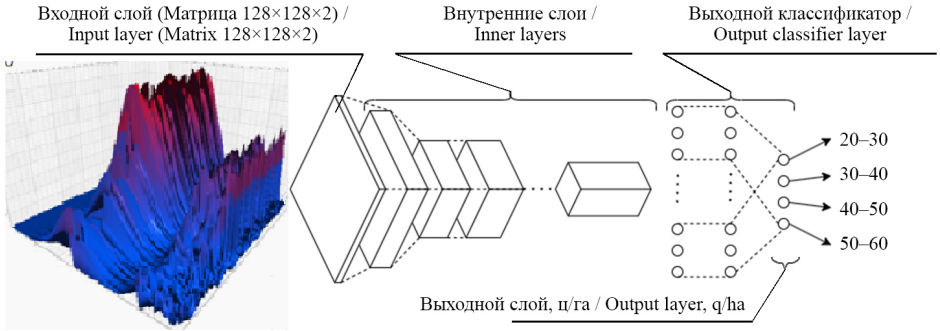
$$f(u,s) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\frac{1}{\sqrt{s}}\psi\left(\frac{t-u}{s}\right)dt$$

с вещественным вейвлетом Морле:

$$\psi\left(\frac{t}{s}\right) = \cos\left(\frac{\omega_0 t}{s}\right)\exp\left(-\frac{t^2}{2s^2}\right),$$

где $f(t)$ − регистрируемый ВП, мВ; t – время, с; S − масштаб, отн. ед.; ω_0 − частота, Гц.

Для оценки урожайности создана глубокая сверточная нейронная сеть с группами ResNet слоев для уменьшения затухания градиентов в процессе обучения [28; 29]. Структура нейронной сети показана на рисунке 2.



Р и с. 2. Структура сверточной нейронной сети
F i g. 2. Structure of a convolutional neural network

Разработанная нейронная сеть состоит из 53 слоев, организованных в ResNet-архитектуру, с классификатором на выходном слое. Классификатор осуществляет анализ вейвлет-спектра, полученного от ВП, и прогнозирует диапазон значений урожайности семян.

[8] Малла С. Вейвлеты в обработке сигналов.

Программная составляющая нейронной сети реализована на языке Python3 с использованием библиотеки Keras[9], которая имеет большой набор инструментов для построения нейронных сетей высокой сложности.

Для обучения нейронной сети каждый ВП вначале подвергался вейвлет-преобразованию. Далее каждое преобразование масштабировалось до размерности 128×128 элементов. Нормализация выполнялась по амплитуде в диапазоне от 0 до 1.

Первый слой состоит из двух матриц 128×128, объединенных в пространственную структуру значений размерностью 128×128×2. В первую матрицу вводится вейвлет-преобразование от ВП (рис. 2). Во вторую матрицу осуществляется запись информации о соотношении K+/Na+.

Выходной слой представляет собой четыре нейрона, характеризующих урожайности семян в диапазоне от 20 до 60 ц/га.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рисунке 3 приведены типичные ВП от различных сортов семян пшеницы и различных соотношений K+/Na+.

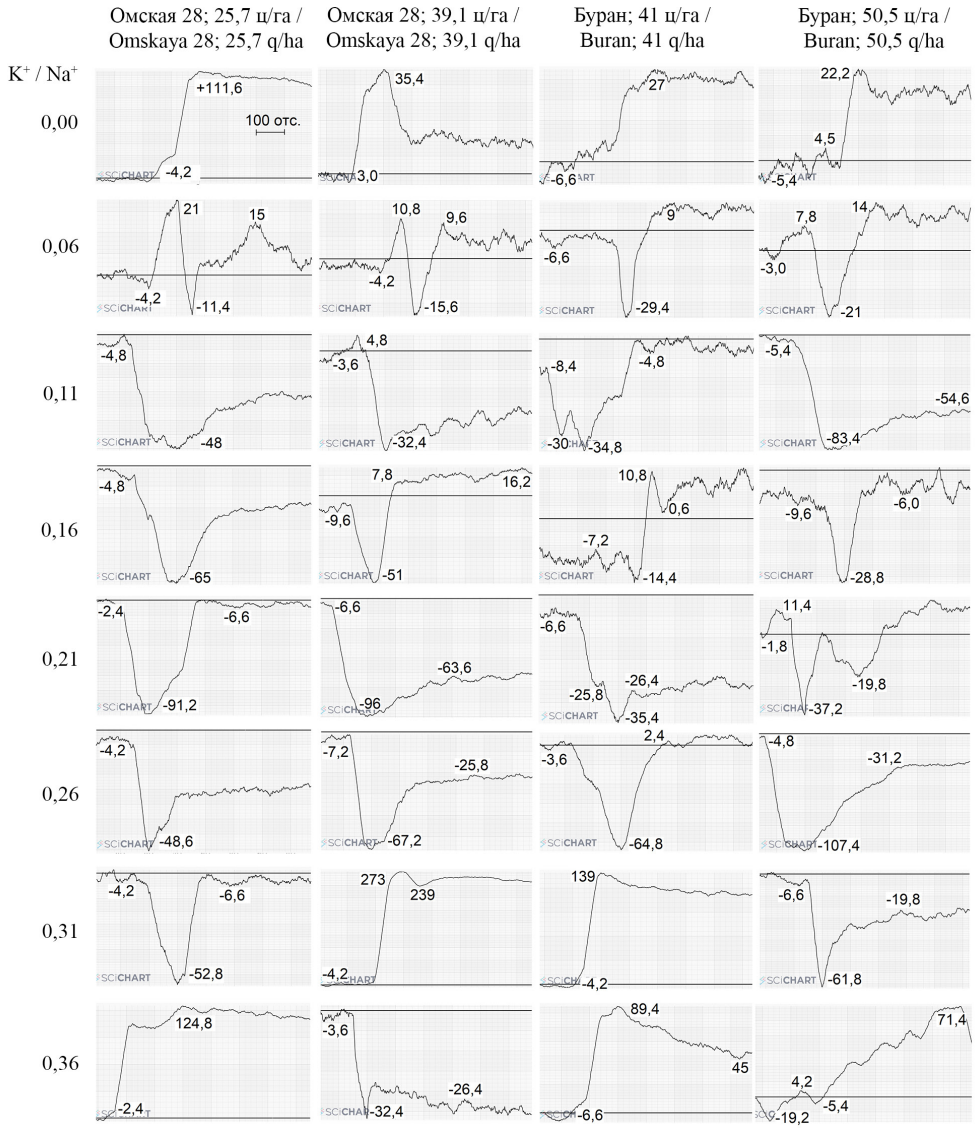
Для одновременного представления всех графиков с максимальным масштабом на одной странице текста на графиках удалены подписи и цифровые обозначения координатных осей.

Ось абсцисс представляет время в отсчетах. 300 отсчетов соответствует одной секунде. На графике в столбце «Омская 28; 25,7 ц/га» при соотношении K+/Na+ = 0,00 на темной полосе обозначен временной интервал в 100 отсчетов. Светлой полосе тоже соответствует 100 отсчетов. Поскольку все графики имеют светлые и темные полосы, то несложно оценить временные интервалы, в которых происходят характерные изменения ВП. Для оценки изменения амплитуды ВП по оси ординат на графиках приведены потенциал покоя, максимальные и минимальные значения ВП в единицах напряжения, мВ. Ось абсцисс (с нулевым значением ВП) отмечена сплошной черной линией.

Проанализируем изменения ВП в столбце «Омская 28; 25,7 ц/га». С увеличением соотношения K+/Na+ происходят существенные изменения формы ВП. При соотношении K+/Na+ = 0,00 (дистиллированная вода) наблюдается классический вид ВП, который содержит три основные области: область незначительного отрицательного потенциала покоя (−4,2 мВ); область деполяризации с повышением мембранного потенциала до максимального значения (+111,6 мВ); область реполяризации с последующим долговременным уменьшением положительного потенциала[10].

При соотношении K+/Na+ = 0,06 наблюдается неустойчивый характер изменения ВП. Вначале отмечается поляризация до −4,2 мВ и деполяризация до уровня 21 мВ. Далее происходит несвойственная растениям и семенам резкая реполяризация до −11,4 мВ с новой деполяризацией до уровня +15 мВ и последующей долговременной реполяризацией.

[9] Keras [Электронный ресурс] : сайт. URL: https://keras.io/ (дата обращения 03.12.2024).
[10] Медведев С.С. Электрофизиология растений.



Р и с. 3. Типичные вариабельные потенциалы от различных сортов семян пшеницы и различных соотношений K+/Na+

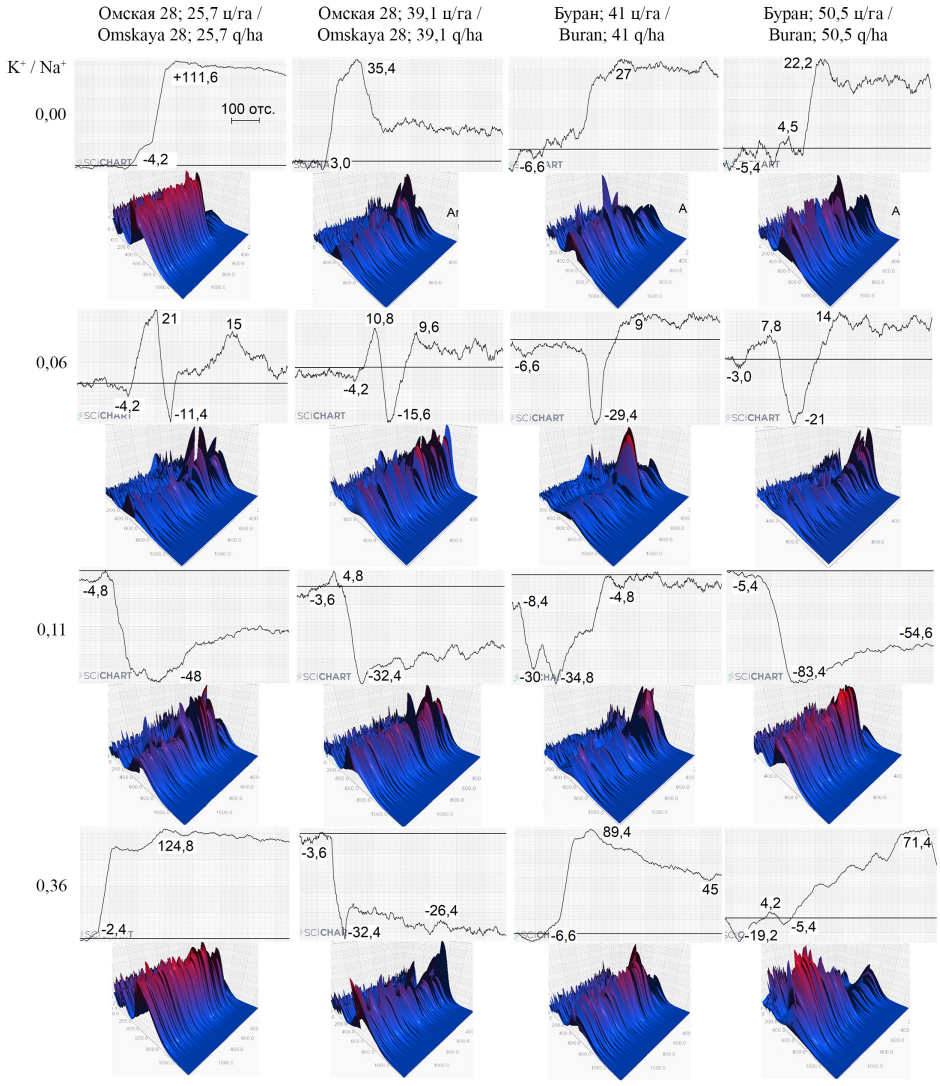
F i g. 3. Typical variable potential of different wheat seed varieties and different K+/Na+ ratios

Источник: рисунки 3, 4 составлены авторами статьи с помощью программы из библиотеки SciChart.
Source: figures 3, 4 compiled by the authors of the article using the program from the SciChart library.

При соотношении K+/Na+ = 0,11 и далее до K+/Na+ = 0,31 ВП становится инвертированным. ВП приобретают только отрицательные значения, причем форма ВП близка к зеркальному отражению классической формы. С повышением калия до соотношения K+/Na+ = 0,36 у ВП восстанавливается первоначальная форма, то есть ВП вновь приобретает классический вид как при K+/Na+ = 0,00.

Аналогичные изменения ВП наблюдаются у семян других сортов пшеницы. При этом ВП содержат свои особенности. Например, ВП Омская 28; 39,1 ц/га восстанавливается при K+/Na+ = 0,31. Возвращение ВП к классическому виду у сорта Буран, 41 ц/га происходит при соотношении K+/Na+ = 0,31 и сохраняется при K+/Na+ = 0,36. У сорта Буран, 50,5 ц/га особенность неустойчивого изменения ВП проявляется при соотношениях K+/Na+ = 0,06 и 0,21.

На рисунке 4 показаны исходные ВП семян пшеницы и их вейвлет-преобразования для всех исследуемых сортов при различных соотношениях K+/Na+.



Р и с. 4. Исходные вариабельные потенциалы семян пшеницы и их вейвлет-преобразования для всех исследуемых сортов при различных соотношениях K+/Na+

F i g. 4. Initial WPs of wheat seeds and their wavelet transforms for all studied varieties at different K+/Na+ ratios

Вейвлет-преобразования показаны как поверхности в трехмерном пространстве. Они расположены ниже графиков ВП. Как видно из рисунка, каждое преобразование имеет свое «лицо», поэтому задача нейронной сети – распознать «лицо» с определенной урожайностью. Из-за большого объема данных на рисунке не показаны вейвлет-преобразования для ВП при соотношениях K+/Na+ в диапазоне от 0,16 до 0,31.

В таблице приведены исходные данные и ответы нейронной сети.

Таблица
Table

Ответы нейронной сети
Neural network answers

Сорт; урожайность, ц/га / Variety; yield, c/ha	Соотношение K+/Na+ / Ratio K+/Na+	Количество ответов на 10 ВП по каждому соотношению K+/Na / Number of responses to 10 VP for each K+/Na ratio K+/Na+				Точность, % / Accuracy, %
		1-й нейрон / first neuron	2-й нейрон / second neuron	3-й нейрон / third neuron	4-й нейрон / fourth neuron	
Омская 28; 25,7 / Omskaya 28; 25.7	0,00	9		1		88,75
	0,06	8		2		
	0,11	9		1		
	0,16	10				
	0,21	8		1	1	
	0,26	10				
	0,31	8	1	1		
	0,36	9		1		
Омская 28; 39,1 / Omskaya 28; 39.1	0,00	1	9			95,00
	0,06		10			
	0,11		10			
	0,16	1	9			
	0,21		9	1		
	0,26		10			
	0,31		9	1		
	0,36		10			
Буран; 41,0 / Buran; 41.0	0,00			10		92,50
	0,06			10		
	0,11			9	1	
	0,16			8	2	
	0,21			10		
	0,26			10		
	0,31	1		8	1	
	0,36		1	9		
Буран; 50,5 / Buran; 50.5	0,00	1		2	7	83,75
	0,06			1	9	
	0,11				10	
	0,16			1	9	
	0,21	1	1	1	7	
	0,26		1	1	8	
	0,31				10	
	0,36		1	2	7	

В первом столбце представлен сорт пшеницы и ее урожайность, во втором – соотношение K+/Na+, в третьем – количество ответов нейронной сети из 10 представленных ей ВП по каждому соотношению и каждому нейрону. Понятие «нейрон» согласно рисунку 2 связано с урожайностью. В четвертом столбце таблицы показана точность правильных ответов нейронной сети в процентах.

Рассмотрим в таблице более подробно ответы нейронной сети по сорту Омская 28 с урожайностью 25,7 ц/га. При соотношении K+/Na+ = 0,00 и прогонке 10 проверочных ВП нейронная сеть в количестве девяти ВП верно отнесла их к первому нейрону, неверно отнесла один ВП к третьему.

При соотношении K+/Na+ = 0,06 и прогонке 10 проверочных ВП нейронная сеть в количестве восьми ВП верно отнесла к первому нейрону, неверно – два ВП к третьему.

Ответы нейронной сети можно проследить далее до соотношения K+/Na+ = 0,36. Как следует из рассматриваемого фрагмента таблицы, нейронная сеть с определенной вероятностью дала правильные ответы по каждому соотношению K+/Na+. Точность верных ответов по урожайности 25,7 ц/га составила 88,75 %. Она вычислялась по формуле относительной частоты F правильных ответов:

$$F = \frac{100}{80}\sum_{i=1}^{8} K_i, \ \%,$$

где 100 – коэффициент перевода относительной частоты, %; 80 – полное количество ВП, предъявленных нейронной сети по урожайности 25,7 ц/га; K_i – количество правильных ответов в i-й строке по соотношению K+/Na+.

По сорту Омская 28 с урожайностью 39,1 ц/га нейронная сеть верно определила второй нейрон с точностью 95 %. Ошибочные ответы равномерно распределены по первому и третьему нейронам.

Высокую точность ответов нейронная сеть показала также для сорта Буран с урожайностью 41,0 ц/га – 92,5 %. Неверные ответы сосредоточены в основном в четвертом нейроне – 6,25 %.

Относительно низкую точность ответов нейронная сеть показала для сорта Буран с урожайностью 50,5 ц/га – 83,75 %. Основное количество неверных ответов содержится в третьем нейроне – 10 %.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

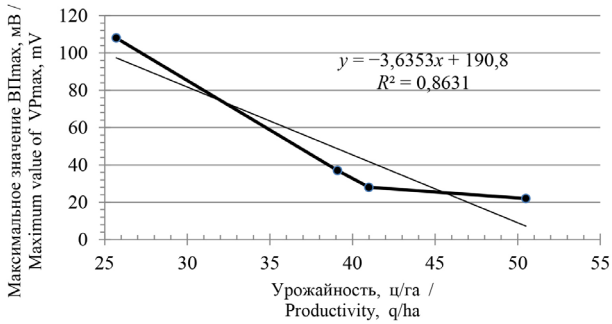
Зафиксированный эффект изменения ВП у семян пшеницы качественно совпадает с изменениями мембранного потенциала у клеток живых организмов при увеличении концентрации калия во внешней среде.

В научной работе [24], посвященной исследованию ионной проницаемости клеточных мембран, отмечено, что при увеличении концентрации ионов калия во внешней среде сначала происходит кратковременное смещение мембранного потенциала в отрицательную сторону относительно потенциала покоя (гиперполяризация), а затем возникает деполяризация. Ходжкин и Хаксли [30] в исследованиях электрофизических свойств мембраны аксона кальмара тоже фиксировали снижение потенциала покоя при повышении содержания ионов калия во внешней среде.

Интересная особенность проявляется в изменении ВП с увеличением урожайности. Одним из признаков ВП является его максимальное значение – VPmax. При соотношении K+/Na+ = 0,00 с увеличением урожайности семян величина максимального значения уменьшается (рис. 3). На рисунке 5 приведена зависимость VPmax от урожайности и линейная аппроксимация экспериментальных точек. Линейная аппроксимирующая функция имеет вид:

$$\mathrm{VPmax} = -3{,}6353x + 190{,}8, \quad (1)$$

где x − урожайность семян. Коэффициент детерминации составляет 0,8631. Следовательно, коэффициент линейной корреляции равен $R = 0{,}929$.



Р и с. 5. Зависимость максимального значения VPmax от урожайности семян пшеницы при замачивании в дистиллированной воде: K+/Na+ = 0,00

F i g. 5. Dependence of the maximum value of VPmax on the yield of wheat seeds when soaked in distilled water: K+/Na+ = 0.00

В статье [8] приведена аналогичная зависимость, полученная для семян пшеницы сортов Алтайская 75, Гранни и Тасос. Зависимость VPmax от урожайности семян у фракции 9 м/с выражена линейным уравнением:

$$\mathrm{VPmax} = -2{,}54x + 249. \quad (2)$$

Коэффициент линейной корреляции составляет 0,65. В указанной статье отмечена только тенденция линейной зависимости изменения VPmax от урожайности.

Теперь, сопоставляя формулы (1) и (2), можно с большой уверенностью сказать о зависимости VPmax от урожайности. Отличия наблюдаются в постоянной составляющей и тангенсе угла наклона линейной функции. Тем не менее, эти отличия скорее подтверждают факт наличия закономерности, чем ее отсутствие, потому что семена принадлежат различным сортам и выращены на различных почвах. С помощью уравнений (1) и (2) можно решать задачу оценки потенциальной урожайности семян по VPmax. Однако при такой оценке отсутствует влияние почвы на семена, поэтому необходимо анализировать ВП при различных соотношениях K+/Na+. Предлагаемые две оценки аналогичны оценкам лабораторной и полевой всхожести у семян пшеницы. В первом случае отсутствует влияние почвы на всхожесть. Вторая оценка характеризует всхожесть в реальных полевых условиях.

Однако исследование изменений урожайности только по признаку VPmax не дает положительного результата из-за слишком малого количества признаков. Анализировать ВП по множеству признаков позволяет вейвлет-преобразование[11] [31].

Разработанная нейронная сеть способна классифицировать потенциальную урожайность семян пшеницы по вейвлет-преобразованиям ВП и соотношениям K+/Na+. Алгоритм оценки потенциальной урожайности семян от соотношения K+/Na+ в почве можно представить следующим образом. Подготавливается почвенная вытяжка и осуществляется набухание в ней исследуемых семян пшеницы. Измеряются ВП семян. Выполняется вейвлет-преобразование. С помощью нейронной сети оценивается потенциальная урожайность исследуемых семян.

Нейронная сеть способна анализировать урожайность у двух сортов. Это ее положительное качество. Точность верных ответов по сорту Омская 28 с урожайностью 25,7 ц/га составила 88,75 %, по сорту Омская 28 с урожайностью 39,1 ц/га − 95 %, по сорту Буран с урожайностью 41,0 ц/га – 92,5 %, по сорту Буран с урожайностью 50,5 ц/га – 83,75 %.

Отрицательное качество сети проявляется на урожайностях 25,7 и 50,5 ц/га. Сеть выдает относительно невысокую точность. Для повышения точности классификации можно ограничить нейронную сеть только одним сортом. В этом случае необходимо будет расширить диапазон урожайностей каждого сорта от 20 до 60 ц/га, то есть расширить базу ВП, что связано с определенными трудностями, потому что для одного сорта семян очень сложно получить с одного поля различные урожайности в широком диапазоне.

Предполагается продолжить исследования взаимодействия семян с почвой по регистируемым ВП. Для этого необходимо осуществить посев на делянках с различными соотношениями K+/Na+; по почвенной вытяжке определить потенциальную урожайность семян, а осенью сравнить с реально полученным урожаем.

Исследование носит фундаментальный характер и направлено на развитие методов прогнозирования урожайности. Оптимизация нормы и дозы внесения калийных удобрений имеет большое значение для повышения экономической эффективности выращивания пшеницы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rahman A., Cho B.-K. Assessment of Seed Quality Using Non-Destructive Measurement Techniques: A Review. *Seed Science Research.* 2016;26(4):285–305. https://doi.org/10.1017/S0960258516000234
2. Fazel-Niari Z., Afkari-Sayyah A.H., Abbaspour-Gilandeh Y., Herrera-Miranda I., Hernández-Hernández J.L., Hernández-Hernández M. Quality Assessment of Components of Wheat Seed Using Different Classifications Models. *Applied Sciences.* 2022;12(9):4133. https://doi.org/10.3390/app12094133
3. Прияткин Н.С., Архипов М.В., Щукина П.А., Мирская Г.В., Чесноков Ю.В. Оценка разнокачественности и скрытой дефектности семян пшеницы (Triticum aestivum L.) инструментальными физическими методами. *Сельскохозяйственная биология.* 2022;57(5):911–920. https://doi.org/10.15389/agrobiology.2022.5.911rus

[11] Малла С. Вейвлеты в обработке сигналов.

4. Shen Y., Li G., Li Z., Ai M., Wang L., Xiong X. Discrimination of Wheat Varieties by Terahertz Time-domain Spectroscopy and Convolutional Neural Network. *Research Article.* 2023;1. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3020250/v1
5. Барышева Н.Н., Пронин С.П., Барышев Д.Д., Беляев В.И. Сравнение мембранного потенциала зерен пшеницы, разделенных на фракции по аэродинамическим свойствам, разных сортов с разной урожайностью. *Инженерные технологии и системы.* 2020;30(4):550–575.https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202004.550-575
6. Ковалев А.В., Исаева А.С. Оценка качества семян пшеницы с использованием сверточной нейронной сети. *Инженерный вестник Дона.* 2021;(12). URL: http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2021/7354 (дата обращения: 01.12.2024).
7. Yao J., Liu J., Zhang Y., Wang H. Identification of Winter Wheat Pests And Diseases Based on Improved Convolutional Neural Network. *Open Life Sciences.* 2023;18(1):20220632. https://doi.org/10.1515/biol-2022-0632
8. Li Y., Cao G., Liu D., Zhang J., Li L., Chen C. Determination of Wheat Heading Stage Using Convolutional Neural Networks on Multispectral UAV Imaging Data. *Computational Intelligence and Neuroscience.* 2022;(1):3655804. https://doi.org/10.1155/2022/3655804
9. Dong Y., Liu Y., Kang H., Li C., Liu P., Liu Z. Lightweight and Efficient Neural Network with SPSA Attention for Wheat Ear Detection. *PeerJ Computer Science.* 2022;8:e931. https://doi.org/10.7717/peerj-cs.931
10. Hasan M.M., Chopin J.P., Laga H., Miklavcic S.J. Detection and Analysis of Wheat Spikes Using Convolutional Neural Networks. *Plant Methods.* 2018;14:100. https://doi.org/10.1186/s13007-018-0366-8
11. Sun X., Li Y., Li G., Jin S., Zhao W., Liang Z., et al. SCGNet: Efficient Sparsely Connected Group Convolution Network for Wheat Grains Classification. *Frontiers in Plant Science.* 2023;14:1304962. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1304962
12. Zhang W., Li Z., Li G., Zhuang P., Hou G., Zhang Q., et al. GACNet: Generate Adversarial-Driven Cross-Aware Network for Hyperspectral Wheat Variety Identification. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* 2023;62. https://doi.org/10.1109/TGRS.2023.3347745
13. Nithyasundari B., Ilakya R., Nissa M., Prabhas D., Kishore K., Kumar K.K. HNNL: Experimental Analysis of Wheat Crop Disease Detection Using Hyper Neural Network Based Learning Methodology. In: 2024 International Conference on Advances in Computing, Communication and Applied Informatics (ACCAI). Chennai, India, 2024:1–7. https://doi.org/10.1109/ACCAI61061.2024.10602195
14. Tolba A., Talal N. An Interpretable Deep Learning for Early Detection and Diagnosis of Wheat Leaf Diseases. *Optimization in Agriculture.* 2024;1:81–93. https://doi.org/10.61356/j.oia.2024.1257
15. Sonmez M.E., Sabanci K., Aydin N. Convolutional Neural Network-Support Vector Machine-Based Approach for Identification of Wheat Hybrids. *European Food Research and Technology.* 2024;250:1353–1362. https://doi.org/10.1007/s00217-024-04473-4
16. Zhuang T., Zhang Yu, Li D., Schmidhalter U., Ata-UI-Karim S.T., Cheng T. Coupling Continuous Wavelet Transform with Machine Learning to Improve Water Status Prediction in Winter Wheat. *Precision Agriculture.* 2023;24:2171–2199. https://doi.org/10.1007/s11119-023-10036-6
17. Li C., Li X., Meng X., Xiao Z., Wu X., Wang X., et al. Hyperspectral Estimation of Nitrogen Content in Wheat Based on Fractional Difference and Continuous Wavelet Transform. *Agriculture.* 2023;13(5):1017. https://doi.org/10.3390/agriculture13051017
18. Молин А.Е., Блеканов И.С., Митрофанов Е.П., Митрофанова О.А. Методы генерации синтетических данных для обучения нейросетей в задаче сегментации уровня азотного режима растений на снимках беспилотных летательных аппаратов на сельскохозяйственном поле. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления.* 2024;20(1):20–33. https://doi.org/10.21638/11701/spbu10.2024.103
19. Gierz Ł., Przybył K. Texture Analysis and Artificial Neural Networks for Identification of Cereals-Case Study: Wheat, Barley and Rape Seeds. *Scientific Reports.* 2022;12:19316. https://doi.org/10.1038/s41598-022-23838-x

20. Zang H., Su X., Wang Y., Li G., Zhang J., Zheng G., et al. Automatic Grading Evaluation of Winter Wheat Lodging Based on Deep Learning. *Frontiers in Plant Science.* 2024;15. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1284861
21. Бисчоков Р.М. Анализ, моделирование и прогноз урожайности сельскохозяйственных культур средствами искусственных нейронных сетей. *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство.* 2022;17(2):146–157. https://doi.org/10.22363/2312-797X-2022-17-2-146-157
22. Барышева Н.Н., Гунер М.В., Барышев Д.Д., Пронин С.П. Нейросетевое исследование данных о качестве семенного материала пшеницы по биоэлектрическим сигналам. *Высоко-производительные вычислительные системы и технологии.* 2020;4(1):179–183. https://elibrary.ru/zrnits
23. Барышев Д.Д., Барышева Н.Н., Пронин С.П. Подготовка обучающей выборки для классификации семян по их урожайным свойствам. *АПК России.* 2020;27(3):440–446. https://elibrary.ru/iqnneh
24. Казак Е.В, Парфенюк В.И. Физико-химические закономерности ионной (Na+,K+) проницаемости функциональной мембраны I. Зависимость ионных потоков через мембрану от времени и концентрации растворов. *Химия и химическая технология.* 2005;48(2):27–34. URL: https://main.isuct.ru/files/journal/t48_v2_full.pdf (дата обращения: 21.10.2024).
25. Пронин С.П., Беляев В.И., Зрюмова А.Г., Петрова И.И. Сравнение урожайности яровой пшеницы при различной концентрации натрия и калия в почве и различном мембранном потенциале семян. *Вестник Алтайского государственного аграрного университета.* 2022;(9):16–24. https://elibrary.ru/kjilvh
26. Алимагадов К.А., Умняшкин С.В. Аугментация данных на основе вейвлет-фильтрации при обучении нейронных сетей. ГрафиКон 2023 : 33-я Междунар. конф. по компьютерной графике и машинному зрению (19–21 сентября 2023 г., г. Москва). 2023:437–442. https://doi.org/10.20948/graphicon-2023-437-442
27. Стефаниди А.Ф., Приоров А.Л., Топников А.И., Хрящев В.В. Применение сверточных нейронных сетей в задаче мультимодальной идентификации. *Цифровая обработка сигналов.* 2020;(2):52–58. URL: http://www.dspa.ru/articles/year2020/jour20_2/art20_2_7.pdf (дата обращения 03.12.2024).
28. Bharati S., Podder P., Mondal M.R., Prasath S. CO-ResNet: Optimized ResNet Model for COVID-19 Diagnosis from X-ray Images. *International Journal of Hybrid Intelligent Systems.* 2021;17(1–2):71–85. https://doi.org/10.3233/HIS-210008
29. Wen L., Li X., Gao L. A Transfer Convolutional Neural Network for Fault Diagnosis Based on ResNet-50. *Neural Computing and Applications.* 2020;32:6111–6124. https://doi.org/10.1007/s00521-019-04097-w
30. Hodgkin A.L., Huxley A.F. A Quantitative Description of Membrane Current and its Application To Conduction And Excitation in Nerve. *Bulletin of Mathematical Biology.* 1990;52:25–71. https://doi.org/10.1007/BF02459568
31. Кан А.Г., Романенко С.В. Фильтрация вольтамперометрических сигналов при помощи вейвлет-преобразования. *Известия Томского политехнического университета.* 2006;309(8):52–54. URL: https://earchive.tpu.ru/handle/11683/1448 (дата обращения: 21.10.2024).

Об авторах:

Пронин Сергей Петрович, доктор технических наук, профессор кафедры информационных технологий Алтайского государственного технического университета им. И. И. Ползунова (656038, Российская Федерация, г. Барнаул, пр. Ленина, д. 46), ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5066-2609, Scopus ID: 6701475629, SPIN-код: 2745-4983, spponin@mail.ru

Зрюмова Анастасия Геннадьевна, кандидат технических наук, заведующая кафедрой информационных технологий Алтайского государственного технического университета им. И. И. Ползунова (656038, Российская Федерация, г. Барнаул, пр. Ленина, д. 46), ORCID: https://orcid.org/0009-0005-1289-6099, a.zrumova@mail.ru

Пилецкий Александр Андреевич, аспирант кафедры информационных технологий Алтайского государственного технического университета им. И. И. Ползунова (656038, Российская Федерация, г. Барнаул, пр. Ленина, д. 46), ORCID: https://orcid.org/0009-0001-2134-2662, ap@ex9.ru

Беляев Владимир Иванович, доктор технический наук, заведующий кафедрой сельскохозяйственной техники и технологий Алтайского государственного аграрного университета (656049, Российская Федерация, г. Барнаул, пр. Красноармейский, д. 98), ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4396-2202, prof-belyaev@yandex.ru

Вклад авторов:

С. П. Пронин – формулирование идеи исследования, целей и задач; осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение и описание экспериментов, сбор и анализ данных; применение статистических, математических, вычислительных и других формальных методов для анализа данных исследования; создание и подготовка рукописи: критический анализ черновика рукописи, внесение замечаний и исправлений членами исследовательской группы, в том числе на этапах до и после публикации.

А. Г. Зрюмова – осуществление научно-исследовательского процесса, включая описание существующих методов контроля, выполнение экспериментов и сбор данных; создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования и полученных данных.

А. А. Пилецкий – осуществление научно-исследовательского процесса, включая разработку нейронной сети, ее обучение, обработку данных, описание архитектуры нейронной сети, выполнение экспериментов и сбор данных; создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования и полученных данных.

В. И. Беляев – осуществление научно-исследовательского процесса, включая подготовку семян пшеницы, консультации по урожайности сортов; создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования и полученных данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила в редакцию 17.01.2025; поступила после рецензирования 13.02.2025; принята к публикации 25.02.2025

REFERENCES

1. Rahman A., Cho B.-K. Assessment of Seed Quality Using Non-Destructive Measurement Techniques: A Review. *Seed Science Research.* 2016;26(4):285–305. https://doi.org/10.1017/S0960258516000234
2. Fazel-Niari Z., Afkari-Sayyah A.H., Abbaspour-Gilandeh Y., Herrera-Miranda I., Hernández-Hernández J.L., Hernández-Hernández M. Quality Assessment of Components of Wheat Seed Using Different Classifications Models. *Applied Sciences.* 2022;12(9):4133. https://doi.org/10.3390/app12094133
3. Priyatkin N.S., Arkhipov M.V., Shchukina P.A., Mirskaya G.V., Chesnokov Yu.V. Evaluation of Heterogeneity and Hidden Defects of Wheat (Triticum Aestivum L.) Seeds by Instrumental Physical Methods. *Agricultural Biology.* 2022;57(5):911–920. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.15389/agrobiology.2022.5.911rus
4. Shen Y., Li G., Li Z., Ai M., Wang L., Xiong X. Discrimination of Wheat Varieties by Terahertz Time-domain Spectroscopy and Convolutional Neural Network. *Research Article.* 2023;1. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3020250/v1
5. Barysheva N.N., Pronin S.P., Baryshev D.D., Belyaev V.I. Comparing the Membrane Potential of Wheat Grains of Different Varieties and Productivity Divided into Fractions According to Their

Aerodynamic Properties. *Engineering Technologies and Systems.* 2020;30(4):550–575. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202004.550-575

6. Kovalev A.V., Isaeva A.S. Evaluation of Wheat Seed Quality Using a Convolu-Tional Neural Network. *Engineering Bulletin of the Don.* 2021;(12). (In Russ., abstract in Eng.) Available at: http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2021/7354 (accessed 01.12.2024).
7. Yao J., Liu J., Zhang Y., Wang H. Identification of Winter Wheat Pests And Diseases Based on Improved Convolutional Neural Network. *Open Life Sciences.* 2023;18(1):20220632. https://doi.org/10.1515/biol-2022-0632
8. Li Y., Cao G., Liu D., Zhang J., Li L., Chen C. Determination of Wheat Heading Stage Using Convolutional Neural Networks on Multispectral UAV Imaging Data. *Computational Intelligence and Neuroscience.* 2022;(1):3655804. https://doi.org/10.1155/2022/3655804
9. Dong Y., Liu Y., Kang H., Li C., Liu P., Liu Z. Lightweight and Efficient Neural Network with SPSA Attention for Wheat Ear Detection. *PeerJ Computer Science.* 2022;8:e931. https://doi.org/10.7717/peerj-cs.931
10. Hasan M.M., Chopin J.P., Laga H., Miklavcic S.J. Detection and Analysis of Wheat Spikes Using Convolutional Neural Networks. *Plant Methods.* 2018;14:100. https://doi.org/10.1186/s13007-018-0366-8
11. Sun X., Li Y., Li G., Jin S., Zhao W., Liang Z., et al. SCGNet: Efficient Sparsely Connected Group Convolution Network for Wheat Grains Classification. *Frontiers in Plant Science.* 2023;14:1304962. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1304962
12. Zhang W., Li Z., Li G., Zhuang P., Hou G., Zhang Q., et al. GACNet: Generate Adversarial-Driven Cross-Aware Network for Hyperspectral Wheat Variety Identification. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* 2023;62. https://doi.org/10.1109/TGRS.2023.3347745
13. Nithyasundari B., Ilakya R., Nissa M., Prabhas D., Kishore K., Kumar K.K. HNNL: Experimental Analysis of Wheat Crop Disease Detection Using Hyper Neural Network Based Learning Methodology. In: 2024 International Conference on Advances in Computing, Communication and Applied Informatics (ACCAI). Chennai, India, 2024:1–7. https://doi.org/10.1109/ACCAI61061.2024.10602195
14. Tolba A., Talal N. An Interpretable Deep Learning for Early Detection and Diagnosis of Wheat Leaf Diseases. *Optimization in Agriculture.* 2024;1:81–93. https://doi.org/10.61356/j.oia.2024.1257
15. Sonmez M.E., Sabanci K., Aydin N. Convolutional Neural Network-Support Vector Machine-Based Approach for Identification of Wheat Hybrids. *European Food Research and Technology.* 2024;250:1353–1362. https://doi.org/10.1007/s00217-024-04473-4
16. Zhuang T., Zhang Yu, Li D., Schmidhalter U., Ata-UI-Karim S.T., Cheng T. Coupling Continuous Wavelet Transform with Machine Learning to Improve Water Status Prediction in Winter Wheat. *Precision Agriculture.* 2023;24:2171–2199. https://doi.org/10.1007/s11119-023-10036-6
17. Li C., Li X., Meng X., Xiao Z., Wu X., Wang X., et al. Hyperspectral Estimation of Nitrogen Content in Wheat Based on Fractional Difference and Continuous Wavelet Transform. *Agriculture.* 2023;13(5):1017. https://doi.org/10.3390/agriculture13051017
18. Molin A.E., Blekanov I.S., Mitrofanov E.P., Mitrofanova O.A. Synthetic Data Generation Methods for Training Neural Networks in the Task of Segmenting the Level of Crop Nitrogen Status on UAV Images of Agricultural Fields. *Vestnik of Saint Petersburg University. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes.* 2024;20(1):20–33. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.21638/11701/spbu10.2024.103
19. Gierz Ł., Przybył K. Texture Analysis and Artificial Neural Networks for Identification of Cereals-Case Study: Wheat, Barley and Rape Seeds. *Scientific Reports.* 2022;12:19316. https://doi.org/10.1038/s41598-022-23838-x
20. Zang H., Su X., Wang Y., Li G., Zhang J., Zheng G., et al. Automatic Grading Evaluation of Winter Wheat Lodging Based on Deep Learning. *Frontiers in Plant Science.* 2024;15. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1284861

21. Bischokov R.M. Analysis, Modelling and Forecasting of Crop Yields Using Artificial Neural Networks. *RUDN Journal of Agronomy and Animal Industries.* 2022;17(2):146–157. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.22363/2312-797X-2022-17-2-146-157
22. Barysheva N.N., Guner M.V., Baryshev D.D., Pronin S.P. Neural Network Research of Data about the Quality of Wheat Seed Material by Bioelectric Signals. *High-Perfomance Computing Systems and Technologies.* 2020;4(1):179–183. (In Russ., abstract in Eng.) https://elibrary.ru/zrnits
23. Baryshev D.D., Barysheva N.N., Pronin S.P. [Preparation of a Training Sample for Classifying Seeds by Their Yield Properties]. *AIC of Russia.* 2020;27(3):440–446. (In Russ.) https://elibrary.ru/iqnneh
24. Kazak E.V., Parfenyuk V.I. Physicochemical Regularities of Ionic (Na+,K+) Permeability of a Functional Membrane I. Dependence of Ionic Flows Through the Membrane on Time and Concentration of Solutions. *Chemistry and Chemical Technology.* 2005;48(2):27–34. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: https://main.isuct.ru/files/journal/t48_v2_full.pdf (accessed 21.10.2024).
25. Pronin S.P., Belyaev V.I., Zryumova A.G., Petrova I.I. Spring Wheat Yield Comparison at Different Sodium and Potassium Concentrations in the Soil and Different Seed Membrane Potentia. *Bulletin of the Altai State Agrarian University.* 2022;(9):16–24. (In Russ., abstract in Eng.) https://elibrary.ru/kjilvh
26. Alimagadov K.A., Umnyashkin S.V. Data Augmentation Based on Wavelet Filtration During Neural Network Training. In: GraphiCon 2023 : Proceedings of the 33rd International Confe-rence on Computer Graphics and Machine Vision (2023 September 19–21, Moscow). 2023:437–442. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.20948/graphicon-2023-437-442
27. Stefanidi A.F., Priorov A.L., Topnikov A.I., Khryashchev V.V. The Problem of Personality Recognition Using Facial Images and Audio Signals with Speech Recordings. *Digital Signal Processing.* 2020;(2):52–58. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: http://www.dspa.ru/articles/year2020/jour20_2/art20_2_7.pdf (accessed 03.12.2024).
28. Bharati S., Podder P., Mondal M.R., Prasath S. CO-ResNet: Optimized ResNet Model for COVID-19 Diagnosis from X-ray Images. *International Journal of Hybrid Intelligent Systems.* 2021;17(1–2):71–85. https://doi.org/10.3233/HIS-210008
29. Wen L., Li X., Gao L. A Transfer Convolutional Neural Network for Fault Diagnosis Based on ResNet-50. *Neural Computing and Applications.* 2020;32:6111–6124. https://doi.org/10.1007/s00521-019-04097-w
30. Hodgkin A.L., Huxley A.F. A Quantitative Description of Membrane Current and its Application To Conduction And Excitation in Nerve. *Bulletin of Mathematical Biology.* 1990;52:25–71. https://doi.org/10.1007/BF02459568
31. Kan A.G., Romanenko S.V. [Filtering of Voltammetric Signals Using Wavelet Transform]. *Bulletin of Tomsk Polytechnic University.* 2006;309(8):52–54. (In Russ.) Available at: https://earchive.tpu.ru/handle/11683/1448 (accessed 21.10.2024).

About the authors:

Sergey P. Pronin, Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Department of Information Technology, Polzunov Altai State Technical University (46 Lenin Ave., Barnaul 656038, Russian Federation), ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5066-2609, Scopus ID: 6701475629, SPIN-code: 2745-4983, spponin@mail.ru

Anastasia G. Zryumova, Cand.Sci. (Eng.), Head of the Department of Information Technology, Polzunov Altai State Technical University (46 Lenin Ave., Barnaul 656038, Russian Federation), ORCID: https://orcid.org/0009-0005-1289-6099, a.zrumova@mail.ru

Alexander A. Piletsky, Postgraduate Student of the Department of Information Technology, Polzunov Altai State Technical University (46 Lenin Ave., Barnaul 656038, Russian Federation), ORCID: https://orcid.org/0009-0001-2134-2662, ap@ex9.ru

Vladimir I. Belyaev, Dr.Sci. (Eng.), Head of the Department of Agricultural Machinery and Technology, Altai State Agricultural University (98 Krasnoarmeyskiy Ave., Barnaul 656049, Russian Federation), ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4396-2202, prof-belyaev@yandex.ru

Authors contribution:

S. P. Pronin – formulating the study, aims and objectives; conducting the study, including the executing and describing the experiments, collecting and analyzing the; using statistical, mathematical, computational and other formal methods for analyzing the study data; preparing of the manuscript: critical analysis of the draft manuscript, comments and corrections made by members of the research group, including at the stages before and after publication.

A. G. Zryumova – conducting the study, describing existing control methods, executing the experiments and collecting the data; preparing the manuscript; visualizing the study results and data obtained.

A. A. Piletsky – conducting the study including the development of a neural network, its training, data processing, description of the neural network architecture, performing experiments and collecting data; preparing a manuscript: visualizing the study results and data obtained.

V. I. Belyaev – conducting the study, including the preparation of wheat seeds, consultations on the yield of varieties; preparing the manuscript: visualizing the study results and the data obtained.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 17.01.2025; revised 13.02.2025; accepted 25.02.2025

https://vestnik.mrsu.ru ISSN 2658-4123, eISSN 2658-6525

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ / TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT

https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202503.465-488
EDN: https://elibrary.ru/xdsitt
УДК 631.862.1:633.082.35:636.2

Оригинальная статья / Original article

Исследования выделения парниковых газов при переработке навоза молодняка крупного рогатого скота

А. Ю. Брюханов, Э. В. Васильев, В. И. Базыкин, Е. В. Шалавина ✉
Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
✉ *shalavinaev@mail.ru*

Аннотация

Введение. В настоящее время расчет эмиссии парниковых газов осуществляется в соответствии с оценками Межправительственной группы экспертов по изменению климата, которые не отражают в полной мере ситуацию в сельском хозяйстве из-за укрупненных методов расчета и отсутствия детализации внутри стран. Оценка во многом зависит от точности расчетов, которую можно повысить за счет учета специфики в разрезе технологий в Российской Федерации, и от проведения фактических замеров при переработке навоза.

Цель исследования. Изучение выделения парниковых газов с применением установки, имитирующей реальные условия переработки подстилочного навоза молодняка крупного рогатого скота.

Материалы и методы. На обоснованной экспериментальной установке, включающей герметичную вентилируемую камеру, имитировали технологию компостирования навоза телят в части его естественного разогрева и замеряли концентрацию выделяемых климатически активных веществ в трех повторностях и в четырех температурных режимах. Исследование включало подготовительный этап – химический анализ, взвешивание и загрузка навоза; основной этап – запуск имитационных условий переработки и фиксирование концентрации загрязняющих веществ в выбросах; заключительный этап – выгрузка и взвешивание навоза. Содержание газов в выбросах определяли на четырехканальном газоанализаторе ЭЛАН плюс. Экспериментальные данные обрабатывали в программе Microsoft Excel. Для определения предельного значения случайной погрешности использовали критерий Стьюдента.

Результаты исследования. На экспериментальной установке были определены концентрации аммиака, сероводорода, метана и углекислого газа в выбросах из навоза молодняка крупного рогатого скота в четырех режимах исследования. Значения средних величин концентрации попадают в интервал среднеквадратичных отклонений, следовательно, полученные данные достоверны.

© *Брюханов А. Ю., Васильев Э. В., Базыкин В. И., Шалавина Е. В., 2025*

Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Обсуждение и заключение. По результатам аналитического обзора выбрана наиболее рациональная конструкция экспериментальной установки. Полученные на ней концентрации газов показали сходимость с результатами аналогичных исследований сторонних авторов. Далее необходимо разработать расчетную модель, учитывающую различные технологии обращения с навозом и позволяющую перейти от концентраций парниковых газов к удельным выбросам.

Ключевые слова: парниковые газы, концентрация парниковых газов в эмиссии, замер концентрации, аммиак, животноводство, переработка навоза

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за помощь в улучшении статьи, а также коллег из Института глобального климата и экологии имени академика Ю. А. Израэля за консультирование.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Брюханов А.Ю., Васильев Э.В., Базыкин В.И., Шалавина Е.В. Исследования выделения парниковых газов при переработке навоза молодняка крупного рогатого скота. *Инженерные технологии и системы.* 2025;35(3):465–488. https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202503.465-488

Study of Greenhouse Gas Emission from Young Cattle Manure Processing

A. Yu. Briukhanov, E. V. Vasilev, V. I. Bazykin, E. V. Shalavina ✉
Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) – branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM, St. Petersburg, Russian Federation
✉ *shalavinaev@mail.ru*

Abstract

Introduction. Present calculations of greenhouse gas emissions follow IPCC estimates, which use the aggregated calculation methods and do not reflect the country-specific details, so they do not give a true picture of the current situation in agriculture. Assessment depends on calculation accuracy, improvable through taking into account Russia-specific technologies and on actual measurements during manure processing.
Aim of the Study. The study is aimed at quantifying greenhouse gas emissions with an experimental setup that simulates real conditions of processing young cattle bedding manure by composting.
Materials and Methods. For the study there was used a validated experimental setup with a sealed ventilated chamber. The setup simulated the technology for composting young cattle bedding manure in terms of its natural heating and measured concentrations of climate-active substances. The study had three repetitions across four temperature modes. The study included the preparatory stage (chemical analysis, weighing and loading of manure); main stage (simulation of processing conditions and monitoring of pollutant concentrations); and final stage (manure unloading and weighing). The study measured the gas content with the use of the four-channel gas analyzer ELAN Plus. The study analyzed the experimental data via Microsoft Excel. Statistical significance was evaluated using Student's t-test.
Results. The concentrations of ammonia, hydrogen sulfide, methane and carbon dioxide in young cattle manure emissions were determined with the use of four temperature modes. Mean concentrations are within standard deviation intervals confirming statistical reliability.

Discussion and Conclusions. The analytical literature review was used to choose the optimal configuration of an experimental setup. Measured gas concentrations showed statistical correlation with comparable published researches. Future work requires developing a computational model, which takes into account diverse technologies for handling manure and makes possible the conversion of greenhouse gas concentrations to specific emission factors.

Keywords: greenhouse gases, concentration, measuring, ammonia, livestock farming, manure processing

Acknowledgements: The authors express sincere thanks to anonymous reviewers for their valuable help in improving the manuscript and the colleagues from Yu. A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology for advising.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

For citation: Briukhanov A.Yu., Vasilev E.V., Bazykin V.I., Shalavina E.V. Study of Greenhouse Gas Emission from Young Cattle Manure Processing. *Engineering Technologies and Systems.* 2025;35(3):465–488. https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202503.465-488

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одними из наиболее актуальных научных и практических направлений научно-технологического развития страны являются объективная оценка выбросов климатически активных веществ от различных отраслей промышленности и от сельского хозяйства и снижение их негативного воздействия на окружающую среду через внедрение наилучших доступных технологий[1]. Общепринятые подходы к расчету эмиссии парниковых газов отражены в Руководящих принципах национальных инвентаризаций парниковых газов Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК)[2]. Основным недостатком данного подхода является усреднение всех стран, что не позволяет учитывать климатические и технологические особенности каждого региона. Вследствие этого оценка эмиссии без учета специфики каждой страны приводит к погрешности до 50 %. Для Российской Федерации становится актуальной разработка собственной методики оценки эмиссии парниковых газов, учитывающей все аспекты производства[3].

Производство сельскохозяйственной продукции связано с выделением в атмосферу целого ряда газов (климатически активных веществ), наносящих вред человеку, животным, окружающей среде [1–3]. Согласно данным Национального

[1] О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации [Электронный ресурс] : Указ Президента Российской Федерации от 28 февраля 2024 г. № 145. URL: https://clck.ru/3P7vZ6 (дата обращения: 16.01.2025).

[2] Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК [Электронный ресурс]. URL: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/russian/index.html (дата обращения: 16.01.2025).

[3] Об утверждении методических рекомендаций по проведению добровольной инвентаризации объема выбросов парниковых газов в субъектах Российской Федерации [Электронный ресурс] : Распоряжение Минприроды России от 16 апреля 2015 г. № 15-р. URL: https://clck.ru/3P7w4j (дата обращения: 16.01.2025).

кадастра антропогенных выбросов[4] в 2021 г. суммарные выбросы парниковых газов от аграрного сектора Российской Федерации составили 121 млн т. CO_2-экв., что соответствует 51,6 % уровня 1990 г. (250 млн т. CO_2-экв.). В 2021 г. вклад закиси азота в общие сельскохозяйственные выбросы был выше (60,0 %) вклада CH_4 (39,2 %), вклад CO_2 составлял около 0,8 %. Снижение выбросов парниковых газов обычно связано с уменьшением поголовья сельскохозяйственных животных, посевных площадей, норм вносимых минеральных удобрений [4; 5].

Общие требования к методологиям расчета выбросов парниковых газов, согласованные друг с другом и с международными требованиями МГЭИК, в основном представлены в стандартизированных документах[5]. Данные документы основаны на расчете с использованием удельных показателей, учитывающих только вид животных (коровы, свиньи и т. п.). Для более точного расчета необходимо еще учитывать технологии переработки навоза и помета. Также данные документы по своему содержанию и методологиям расчета согласованы с Протоколом по выбросам парниковых газов и методологиями Руководств МГЭИК.

В настоящее время расчет эмиссии парниковых газов осуществляется в соответствии с оценками МГЭИК, которые не отражают в полной мере ситуацию по эмиссиям в сельском хозяйстве из-за применения укрупненных методов расчета и отсутствия детализации внутри каждой из стран. Оценка зависит от точности замеров. Проводимые исследования направлены на повышение точности расчетов за счет учета специфики в разрезе технологий Российской Федерации и проведению фактических замеров при переработке навоза методом компостирования.

Целью исследования было изучение выделения парниковых газов с применением установки, имитирующей реальные условия переработки подстилочного навоза молодняка крупного рогатого скота (КРС) методом компостирования.

Задачи исследования: 1) определить концентрации аммиака в эмиссии от навоза молодняка КРС; 2) определить концентрации сероводорода в эмиссии от навоза

[4] Национальный кадастр антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990–2021 гг. [Электронный ресурс]. URL: https://www.meteorf.gov.ru/press/news/32581/ (дата обращения: 16.01.2025).

[5] ГОСТ Р ИСО 14064-1:2007. Газы парниковые. Часть 1. Требования и руководство по количественному определению и отчетности о выбросах и удалении парниковых газов на уровне организации [Электронный ресурс]. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200077407 (дата обращения: 21.10.2024); ГОСТ Р ИСО 14064-2-2007. Газы парниковые. Часть 2. Требования и руководство по количественной оценке, мониторингу и составлению отчетной документации на проекты сокращения выбросов парниковых газов или увеличения их удаления на уровне проекта [Электронный ресурс]. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200077680 (дата обращения: 21.10.2024); ГОСТ Р ИСО 14064-3-2007. Газы парниковые. Часть 3. Требования и руководство по валидации и верификации утверждений, касающихся парниковых газов [Электронный ресурс]. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200077410 (дата обращения: 21.10.2024); ГОСТ Р 56267-2014/ISO/TR 14069:2013. Газы парниковые. Определение количества выбросов парниковых газов в организациях и отчетность. Руководство по применению стандарта ИСО 14064-1 [Электронный ресурс]. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200118638 (дата обращения: 21.10.2024); Об утверждении методических указаний и руководства по количественному определению объема выбросов парниковых газов организациями, осуществляющими хозяйственную и иную деятельность в Российской Федерации [Электронный ресурс] : Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 30 июня 2015 г. № 300. URL: https://docs.cntd.ru/document/420287801 (дата обращения: 21.10.2024); Рекомендации по расчету выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от объектов животноводства и птицеводства : информационный материал [Электронный ресурс]. URL: https://docs.cntd.ru/document/437016946 (дата обращения: 21.10.2024); ТКП 17.08-11-2008 (02120). Правила расчета выбросов от животноводческих комплексов, звероферм и птицефабрик [Электронный ресурс]. URL: https://clck.ru/3P7yH4 (дата обращения: 21.10.2024).

молодняка КРС; 3) определить концентрации метана в эмиссии от навоза молодняка КРС; 4) определить концентрации углекислого газа в эмиссии от навоза молодняка КРС.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Исследователи из разных стран занимаются проблемой оценки и возможного снижения выбросов климатически активных веществ от систем переработки навоза и помета путем совершенствования технологий и модернизации производства, что предусматривает внедрение эффективных практик ведения сельского хозяйства.

В исследованиях, выполненных в ряде стран, применяли различные методы определения количества выделяемых климатически активных веществ в животноводстве и растениеводстве. В Канаде в 1995 г. были проведены исследования [6] с замером выбросов метана от открытых хранилищ жидкого свиного навоза и жидкого навоза молочного скота. Отобранный воздух был проанализирован на содержание метана с помощью газового хроматографа Shimadzu, оснащенного пламенно-ионизационным детектором (модель 8AIF) и колонкой Poropak Q. Используя этот метод, годовую эмиссия CH_4 из резервуара для свиного навоза оценили в 56,5 кг CH_4 на м^2 поверхности резервуара в год (±20 %).

В 1996 г. в Дании проведены исследования [7] по оценке эмиссии парниковых газов (CH_4 и N_2O) от открытых хранилищ жидкого навоза КРС при применении различных укрывных материалов – соломы, плавающих керамзитовых шариков и естественной корки, образующейся на поверхности навоза. Результаты показали, что эмиссия CH_4 сократилась в среднем на 38 % при использовании любого вида исследуемых покрытий.

Ученые из Германии в 2001 г. провели измерения [8] газообразных выбросов при компостировании отходов животноводства в рамках проекта, направленного на определение баланса азота в биологическом земледелии. Результаты показали, что выбросы аммиака и метана снижаются в течение двух-трех недель, в то время как закись азота выделяется в основном в середине периода компостирования.

Германскими учеными 2006 г. проведены исследования [9] по замеру эмиссии парниковых газов от закрытых по сравнению с открытыми хранилищами. Свиной навоз хранился в контейнерах объемом 65 л. Содержание сухого вещества в навозе составляло от 5 до 8 %. Период хранения составлял не менее 162 дней. Навоз хранился в открытых контейнерах, которые закрывались и проветривались только при измерении методом вентилируемой камеры. Высота контейнера составляла 49 см. Скорость вентиляции во время измерений регулировалась таким образом, чтобы воздух в пространстве всегда менялся один раз в минуту.

В 2008 г. в Австралии были проведены исследования [10] по замеру газов от одного навозохранилища с помощью различных устройств – аэродинамической трубы и динамической эмиссионной камеры. Все образцы проанализированы в течение 24 ч после сбора. Результаты показали, что концентрация запаха была неизменно выше в образцах, собранных с помощью поточной камеры (соотношение от 10:7 до 5:1 по сравнению с образцами из аэродинамической трубы), в то время как коэффициенты эмиссии запаха были неизменно выше, когда они были

получены из аэродинамической трубы (соотношение от 60:1 до 240:1 по сравнению со значениями из поточной камеры).

Китайскими учеными в 2014 г. проведены исследования [11] с измерением выбросов N_2O, CH_4 и CO_2 от твердого навоза мясного скота, хранящегося в штабелях. Исследования проводились для четырех вариантов штабелей (навоз во всех штабелях был одинаковый): 1) штабель высотой 20 см без укрывного материала; 2) штабель высотой 40 см без укрывного материала; 3) штабель высотой 20 см, покрытый сверху опилками слоем в 2 см; 4) штабель высотой 40 см, покрытый сверху опилками слоем в 2 см. Замеры начались 29 мая и длились в течение 49 дней. Для измерения выбросов парниковых газов в лабораторном эксперименте было спроектировано и построено двенадцать поливинилхлоридных цилиндрических (30 см в диаметре и 90 см в высоту) статических камер. Пробы передавались в лабораторию. Результаты исследования свидетельствуют о том, что твердый навоз мясного скота при высоте штабеля 40 см без покрытия опилками производит наименьшее количество выбросов парниковых газов.

В 2015 г. учеными из США [12] проводились замеры парниковых газов от открытых хранилищ жидкого свиного навоза для определения характеристик созревания навоза. Результаты показали, что при ежедневном добавлении свежей мочи и кала в систему сбора навоза необходимо минимум пять недель для оценки состава навоза и выбросов в атмосферу для определения влияния рациона на выбросы.

Ученые из США [13] в 2016 г. предложили ряд методов количественной оценки потоков парниковых газов в системах животноводства. Для измерения выбросов парниковых газов от животных часто используются так называемые «дыхательные камеры» (*respiration chambers*), боксы на голову (*headboxes*), методы определения индикаторных газов или методы получения газов *in vitro*. В некоторых случаях используется комбинация этих методов. Наиболее распространенные методы измерения выбросов парниковых газов из помещений для содержания животных включают использование методов индикаторного газа или прямых/непрямых измерений вентиляции в сочетании с измерением концентрации интересующих газов. Существует ряд химических методов количественного определения концентрации парниковых газов и других газов, представляющих интерес, включая газовую хроматографию, инфракрасную спектроскопию, инфракрасную спектроскопию с открытым каналом преобразования Фурье (OP-FTIR) технологии, фотоакустическую спектроскопию (PAS), масс-спектроскопию (MS), перестраиваемую диодную лазерную абсорбционную спектроскопию (TDLAS) и твердотельные электрохимические технологии. Каждый метод имеет свои преимущества и проблемы при использовании в заявленных целях.

В 2017 г. в США (штат Висконсин) проведены исследования [14] с замером парниковых газов от жидкой фракции навоза КРС. Жидкая фракция навоза хранилась в пластиковых бочках объемом 0,21 м^3. Результаты исследования показали, что ферментация навоза с последующим разделением на фракции снизила выбросы CH_4 с 3,9 до 1,3 г CO_2-экв, но увеличила выбросы закиси азота (N_2O) с 0,6 до 2,0 г CO_2-экв.

В 2019 г. на Украине в Институте сельского хозяйства Карпатского региона Национальной академии аграрных наук Украины проведены исследования [15] по определению количества выбросов во время анаэробной ферментации свиного навоза (*in vitro*) с добавлением природных сорбентов в различных дозах. Исследования проводили с помощью газового детектора-анализатора Dozor S-M-5. Определяли эмиссии CH_4, CO_2 и NO. Было доказано экспериментально, что применение вермикулита и сапонита наиболее эффективно в дозе 5 % и вызывает снижение уровня газовыделения из навоза свиней на 18,6–37,5 % и 7,2–37,5 % соответственно.

В США (штат Айова) в 2020 г. в рамках исследования влияния рационов кормления свиней на эмиссии парниковых газов проводили соответствующие замеры от навоза [16]. Рационы с более высоким содержанием клетчатки увеличивали концентрацию азота, углерода и общего количества летучих жирных кислот (ЛЖК) в навозе и повышали выбросы ЛЖК, но снижали выбросы аммиака. Уменьшение размера частиц рациона снизило концентрацию азота, углерода, ЛЖК, фенольных веществ и индола в навозе и уменьшило выбросы общих ЛЖК. Но ни состав рациона, ни размер частиц не влияли на выбросы парниковых газов в навозе.

Итальянскими учеными [17] в 2022 г. проведена серия экспериментов для сравнения и оценки прямых измерений выбросов аммиака и парниковых газов с использованием одной статической и двух динамических камер (*static and dynamic hoods*) при хранении навоза КРС. Исследования показали, что использование динамических камер, несмотря на их различия в размерах, эксплуатации и применяемом потоке воздуха, дает сопоставимые показатели эмиссии (*emission rates*) для всех анализируемых выбросов и соединений. Эти показатели всегда выше, полученных с использованием статических камер. Поэтому использование динамических камер является ценным методом для уточнения косвенной оценки выбросов.

Учеными из Казанского государственного энергетического университета разработана методика измерения метана из буртов куриного помета [18]. По этой методике в бурте проделывали отверстие диаметром 40 мм и глубиной 500 мм для снижения влияния климатических условий (выветривания). Далее в отверстие помещали щуп, присоединенный к измерительному прибору «Комета-М», и производились замеры при включенном насосе в течение 2–3 мин. Далее проделывалось следующее отверстие на расстоянии 40 см от первого, и измерения повторялись. Программа позволяла собирать и анализировать эмиссии метана.

В начале 2000-х была инициирована исследовательская программа GRACEnet (*Greenhouse gas reduction through agricultural carbon enhancement network*) с целью обеспечить более точную количественную оценку выбросов парниковых газов из почв сельскохозяйственных угодий. Был разработан общий протокол соответствующих измерений, который устанавливал определенные методологические основы, касающиеся соотношения между поверхностью и высотой камер, типа контейнера для отбора проб воздуха, типа корректировки данных для расчета интенсивности выбросов, периода времени, в течение которого проводятся измерения, и часов

в течение дня, наиболее удобных для отбора проб. По этому протоколу в Аргентине в Институте климата и воды в составе Национального института сельскохозяйственных технологий (INTA-ICyA) в 2009 г. начали проводить полевые измерения с помощью статических камер. Результаты показали, что существует высокая вариабельность выбросов N_2O, обусловленная климатическими условиями (количество осадков, температура воздуха и температура верхнего слоя почвы), эдафическими условиями (водонаполненная пористость, NO_3) и типом сельскохозяйственных культур [19].

В Финляндии в 2004 г. провели исследования [20] по сравнению различных камерных методов для измерения CO_2, выделяемого почвой. Для измерения выделения почвенных газов широко используются три основных камерных метода: при помощи непроточной камеры с нестабильной/неустойчивой средой (*non-steady-state non-through-flow chamber*), также известной как закрытая статическая камера; проточной камеры с нестабильной/неустойчивой средой (*non-steady-state through-flow chamber*), известной как закрытая динамическая камера; проточной камеры со стабильной/устойчивой средой (*steady-state through-flow chamber*) или открытой динамической камеры. По результатам исследований общая тенденция заключалась в том, что непроточные камеры с нестабильной/неустойчивой средой систематически занижали результаты на 4–14 %, тогда как существенных различий между проточными камерами не наблюдалось. Камеры с проточным режимом и нестабильной/неустойчивой средой либо занижали, либо завышали выделение газа от −21 до +33 % в зависимости от типа камеры и способа смешивания воздуха в свободном пространстве камеры. Однако, когда результаты всех протестированных систем были усреднены, выделения газа находились в пределах 4 % от эталонных значений. Камеры с непроточным режимом и нестабильной/неустойчивой средой либо занижали, либо завышали выделение от –35 до +6 %.

Методики измерений выделения газов из почвы и конструкции камер находились в поле зрения многих исследователей в разных странах. Например, P. Rochette [21] показал, что недостатки в конструкции и размещении непроточных камер с нестабильной/неустойчивой средой (*non-flow-through non-steady-state chambers*) привели к получению ненадежных данных и большой неопределенности при измерении потоков N_2O в почве. Размещение камер на поверхности почвы часто изменяло измеряемый поток газа за счет изменения вертикального профиля концентрации газа, энергетического баланса и режима турбулентности. Поэтому необходимо было выработать стандартную методологию с набором минимальных требований к конструкции камеры. Это повысило бы надежность и достоверность измерений, обеспечило методологическую согласованность и позволило проводить сравнения между исследованиями.

В Руководстве Альянса мировых исследований по парниковым газам в сельском хозяйстве (GRA) в 2020 г. [22] обсуждались основные принципы и минимальные требования к проектированию непроточных камер с нестабильной/неустойчивой средой (*non-flow-through non-steady-state chambers*), чтобы минимизировать влияние метода измерения на естественные процессы в почве и атмосфере. В Руководстве даются указания и рекомендации по материалам, размерам, вентиляции, герметизации,

изоляции, глубине размещения, отверстию для отбора проб, а также отмечается необходимость поддержания роста и активности растений в процессе исследования.

По инициативе Немецкого общества почвоведения (*Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft*) Рабочая группа по почвенным газам в 2022 г. составила Руководство по наилучшей практике измерения потоков углекислого газа, метана и закиси азота между почвенно-растительными системами и атмосферой с помощью камер с нестабильной/неустойчивой средой [23] с целью обобщить исследовательский опыт в этой области.

В Российской Федерации также проводятся исследования по определению выделения почвой парниковых газов (почвенному дыханию). Коллективом ученых из разных научных организаций была проведена оценка эмиссии парниковых газов на осушенных торфяниках Северо-Запада Российской Федерации. Для проведения измерений использовались статические камеры квадратного сечения с площадью основания 0,49 м^2, высотой 25 и 50 см, объемом 119 и 206 л соответственно. В процессе исследования был измерен 101 поток CO_2 и такое же количество потоков CH_4. На основе полученных данных рассчитаны среднесуточные потоки (г м$^{-2}$ сут$^{-1}$) и факторы эмиссии (т CO_2-экв./га · г). Фактические замеры подтвердили предшествующие измерения и полученные результаты, а также показали соответствие фактических потоков парниковых газов данным, полученным другими исследователями в других регионах, и в первую очередь данным, приведенным в Пятом оценочном докладе МГЭИК [24].

Российскими учеными в 2023 г. проведены исследования [25] эмиссий парниковых газов из природных экосистем Норильского промышленного района. Измерения удельных потоков парниковых газов проводились методом ручных статических темных камер с водяным замком. Для исследования водных экосистем применялись темные плавающие камеры. Полученные результаты показали значительную вариабельность эмиссии парниковых газов для различных типов экосистем.

Учеными из Томска[6] описаны методы измерения эмиссии и поглощения газов почвами. Наибольшее внимание уделено классическому камерному методу. Теория рассмотрена на нескольких уровнях: 1) качественном, дающем лишь общее представление о методе; 2) элементарном количественном, позволяющем применять метод в основных стандартных ситуациях; 3) строгом количественном. Обычно применяются пластиковые и металлические камеры из стали и алюминия. Камера большого объема обязательно должна комплектоваться вентилятором для перемешивания воздуха в ней. Также используются датчики для измерения температуры внутри объема камеры. Основной тип камеры состоит из двух частей – плексигласового колпака и основания из нержавеющей стали.

Анализ литературных источников показал, что для замера эмиссии климатически активных веществ используются преимущественно специальные камеры (табл. 1), которые могут быть выполнены в разных вариантах (ящики, цилиндры, баки, бочки) из разных материалов (нержавеющая сталь, дерево, пластик).

[6] Глаголев М. В., Сабреков А. Ф., Казанцев В. С. Методы измерения газообмена на границе почва/атмосфера : учеб. пособие. Томск : Изд-во Томского государственного педагогического университета, 2010. 96 с. URL: https://clck.ru/3P7yXm (дата обращения: 21.10.2024).

Таблица 1
Table 1

Применяемые методы определения эмиссии климатически активных веществ в сельском хозяйстве
Methods used to determine emissions of climate-active substances in agriculture

Страна / Country	Место исследования / Research site	Метод проведения измерений / Measurement method	Метод обработки проб / Sample analysis method	Метод определения значений. Прибор / Method for determining values. Instrument
1	2	3	4	5
Канада / Canada	Открытое хранилище жидкого свиного навоза / Open storage of liquid pig manure	Вакуумный насос / Vacuum pump	Передача образцов воздуха в лабораторию / Transferring air samples to the laboratory	Газовая хроматография / Gas chromatography
Дания / Denmark	Открытое хранилище жидкого навоза крупного рогатого скота / Open storage of liquid cattle manure	Статическая камера / Static camera	Передача образцов воздуха в лабораторию / Transferring air samples to the laboratory	Газоанализатор Varian 3300 / Gas analyzer Varian 3300
Германия / Germany	Открытое хранилище жидкого свиного навоза / Open storage of liquid pig manure	Динамическая камера / Dynamic camera	Передача образцов воздуха в лабораторию / Transferring air samples to the laboratory	ИК-Фурье-спектрометр / FT-IR spectrometer
Австралия / Australia	Открытое хранилище жидкого свиного навоза / Open storage of liquid pig manure	Аэродинамическая труба и динамическая камера / Wind tunnel and dynamic camera	Передача образцов воздуха в лабораторию / Transferring air samples to the laboratory	Ольфактометрия / Olfactometry
Китай / China	Площадка переработки твердого навоза крупного рогатого скота / Solid cattle manure processing site	Статическая камера / Static camera	Передача образцов воздуха в лабораторию / Transferring air samples to the laboratory	Газовая хроматография / Gas chromatography
США / USA	Открытое хранилище жидкого свиного навоза / Open storage of liquid pig manure	Динамическая камера / Dynamic camera	Передача сорбционных трубок в лабораторию / Transfer of sorption tubes to the laboratory	Термическая десорбция / Thermal desorption
США / USA	Открытое хранилище жидкой фракции навоза крупного рогатого скота / Open storage of liquid fraction of cattle manure	Динамическая камера / Dynamic camera	Режим реального времени / Real time mode	ИК-Фурье-спектрометр / FT-IR spectrometer
Италия / Italy	Открытое хранилище твердого навоза крупного рогатого скота / Open storage of solid cattle manure	Динамические и статические камеры / Dynamic and static cameras	Передача образцов воздуха в лабораторию / Transferring air samples to the laboratory	Газовая хроматография / Gas chromatography

Окончание табл. 1 / End of table 1

1	2	3	4	5
Аргентина / Argentina	Пастбища, пашни / Pastures, arable lands	Статическая камера / Static camera	Передача образцов воздуха в лабораторию / Transferring air samples to the laboratory	Газовая хроматография / Gas chromatography
Финляндия / Finland	Земельные угодья / Land holdings	Динамические и статические камеры / Dynamic and static cameras	Режим реального времени / Real time mode	Инфракрасный газоанализатор EGM-4 / Infrared gas analyzer EGM-4
Россия / Russia	Земельные угодья / Land holdings	Динамическая камера / Dynamic camera	Режим реального времени / Real time mode	Газоанализатор LI-7810, Li-Cor / Gas analyzer LI-7810, Li-Cor
Россия / Russia	Земельные угодья / Land holdings	Динамическая камера / Dynamic camera	Передача образцов воздуха в лабораторию / Transferring air samples to the laboratory	Газовая хроматография / Gas chromatography

В зависимости от условий работы камеры могут быть стационарными (жестко закрепленными на исследуемом объекте) или нестационарными (переносными от исследуемого объекта к объекту). С учетом того, что исследования проводятся на различных материалах в различных хозяйствах, целесообразнее применять нестационарные (переносные) камеры.

По конструкции камеры подразделяются на проточные вентилируемые (динамические) и непроточные невентилируемые (статические). Динамические камеры непрерывно продуваются воздухом, обеспечивая при этом приближение к естественным условиям нахождения навозохранилищ. Нагнетание воздуха обеспечивается напорным и вытяжным вентиляторами. Воздух в динамических камерах может отбираться и анализироваться на выходе из камеры. В статических камерах нет принудительного движения воздуха. Отбор воздуха происходит из отверстия, закрываемого пробкой.

Использование статических (непроточных, невентилируемых) камер позволяет отбирать образцы для анализов только вручную. Необходимо множество образцов для моделирования всей картины в целом. Можно использовать автоматические пробоотборники, однако тогда стоимость исследований значительно возрастет.

Использование динамических (проточных вентилируемых) камер позволяет обеспечить непрерывный отбор проб после достижения устойчивых условий, что сокращает количество проб на каждое наблюдение.

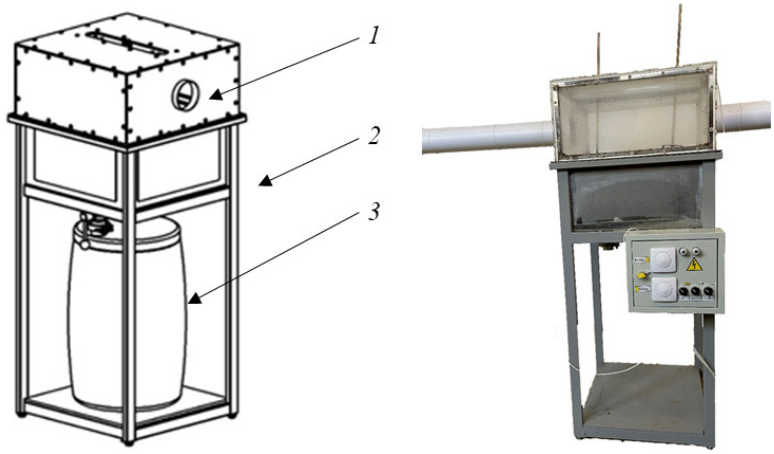
В Российской Федерации переработка твердого навоза и помета в основном осуществляется на открытых гидроизолированных площадках, а большинство хранилищ жидкого навоза открытые. Поэтому целесообразнее при проведении исследований по замеру эмиссии парниковых газов использовать динамическую (вентилируемую) камеру, которая наиболее приближена к погодным условиям (ветрам).

Проведенный аналитический обзор литературных источников позволил сделать вывод, что для исследования выбросов при обращении с различными видами навоза и помета наиболее рационально использование закрытых герметичных вентилируемых и невентилируемых камер. По результатам обзора обоснована конструкция экспериментальной лабораторной установки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Экспериментальная установка

Для проведения исследований в лаборатории биоконверсии ИАЭП – филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ в 2024 г. была разработана и собрана экспериментальная установка, состоящая из герметичной камеры, каркаса и емкости для слива жидкой фракции навоза (рис. 1).



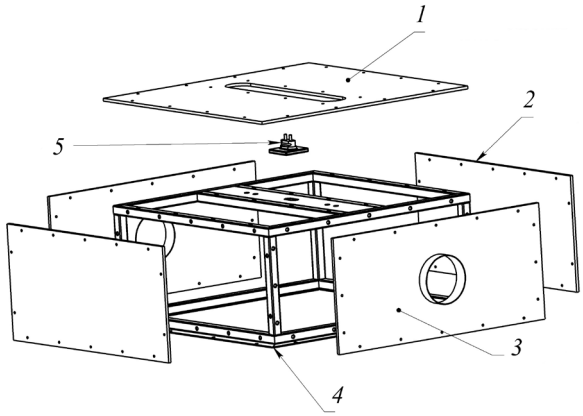
Р и с. 1. Общий вид разработанной экспериментальной установки:
1 – герметичная камера; *2* – каркас; *3* – емкость для слива жидкой фракции навоза

F i g. 1. General view of the designed experimental setup:
1 – an airtight chamber; *2* – a frame; *3* – a container for draining the liquid fraction of manure

Источник: рисунки 1–3, 5–7 составлены авторами статьи.
Source: figures 1–3, 5–7 were made by the authors of the article.

Герметичная камера состоит из двух частей: нижняя часть размером 500×500×250 мм и объемом 0,0625 м^3 из нержавеющей стали выполняет функцию накопителя навоза/помета; верхняя часть размером 500×500×250 мм (длина, ширина и высота соответственно) выполнена в виде каркаса из нержавеющих труб, обшитого прозрачным акрилом через винтовые заклепки.

Боковые стенки верхней части имеют фланцы для присоединения трубы диаметром 100 мм. Нижняя и верхняя части камеры крепятся к раме на болтовое соединение. В герметичной камере предусмотрен подогрев материала за счет инфракрасного нагревателя на верхней части и нагревательных элементов на нижней части камеры. В верхней части прозрачного колпака установлена светодиодная подсветка (рис. 2).



Р и с. 2. Верхняя часть камеры:
1 – верхняя стенка; *2* – боковая стенка; *3* – боковая стенка с фланцем; *4* – каркас; *5* – лампа
F i g. 2. Upper part of the chamber:
1 – top wall; *2* – side wall; *3* – side wall with flange; *4* – carcass; *5* – lamp

Для нагрева материала используется инфракрасный нагреватель ECP-3 с термопарой. Его мощность регулируется в диапазоне 50–150 Вт.

Постоянная имитация естественной среды внутри камеры обеспечивается приточным и вытяжным вентиляторами. Они оснащены частотными преобразователями для задания необходимой частоты вращения. Это обеспечивает установление, поддержание и контроль необходимой скорости движения воздуха внутри камеры (рис. 3).



Р и с. 3. Приточный воздуховод и вмонтированный в него регулируемый вентилятор
F i g. 3. Supply air duct and adjustable built-in fan

Через специально подготовленные отверстие в вытяжном трубопроводе в него вводится пробоотборный зонд ПЗ 1.2 со специальным наконечником, выбираемым в соответствии с установленной скоростью движения воздуха в трубопроводе.

Пробоотборный зонд соединяется с газоанализатором посредством второпластовых трубок. Выбранные материалы не вступают в реакцию с исследуемыми газами, что способствует получению адекватных результатов исследования (рис. 4).





Р и с. 4. Измерение концентрации газов с помощью пробоотборного зонда и газоанализатора ЭЛАН плюс

F i g. 4. Measuring gas concentration using a sampling probe and the ELAN Plus gas analyzer

Источник: фотографии сделаны в процессе измерения концентраций газов с помощью пробоотборного зонда и газоанализатора ЭЛАН плюс в лаборатории биоконверсии ИАЭП – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ ведущим научным сотрудником Э. В. Васильевым (на фото научный сотрудник В. И. Базыкин) 15 августа 2024 г.

Source: the photographs were taken during the process of measuring gas concentrations using a sampling probe and the gas analyzer ELAN Plus in the bioconversion laboratory of the IEEP – branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM by leading researcher E.V. Vasiliev (in the photo researcher V. I. Bazykin) on 15.08.2024.

Предусмотрено, что разработанная лабораторная экспериментальная установка позволяет определить выбросы при различных системах обращения с навозом и пометом. Конструкция установки предусматривает также проведение исследований как в вентилируемой, так и в невентилируемой герметичной камере.

В данном исследовании имитировалась технология компостирования подстилочного навоза телят. Пробы навоза из телятника отбирались на комплексе КРС, расположенном в Северо-Западном федеральном округе. В качестве подстилочного материала на предприятии используется солома.

Порядок проведения исследования

Экспериментальное исследование разделено на три этапа.

Этап 1 (подготовительный)

Навоз из телятника доставлялся в лабораторию биоконверсии ИАЭП – филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, взвешивался весами Smart Sensor и загружался в емкость герметичной камеры вручную. Пробы навоза передавались на анализ в аналитическую лабораторию ИАЭП – филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ.

Этап 2 (основной)

Устанавливались имитационные условия обращения с навозом. Под ними понималось максимальное приближение к реальным условиям переработки навоза, то есть его саморазогрев за счет:

– нагрева материала сверху с помощью инфракрасного нагревателя, что имитирует воздействие солнечного света на материал при различных способах его хранения;

– перемешивания материала, что имитирует технологические операции при компостировании и обеспечивает саморазогрев смеси;

– создания в камере воздушного потока, имитирующего потоки ветра с помощью присоединения к боковым стенкам с фланцами труб диаметром 100 мм и установки на входной трубе регулируемого вентилятора.

После запуска имитационных условий, осуществлялась фиксация концентрации загрязняющих веществ в образующихся выбросах. Измерения объемной доли диоксида углерода (CO_2), метана (CH_4), сероводорода (H_2S) и аммиака (NH_3) проводили с помощью четырехканального газоанализатора ЭЛАН плюс [7].

Твердый материал исследовали на предмет выделения газов в четырех температурных режимах:

– при температуре +21,3 °С (через 1 ч после загрузки в камеру);

– при температуре +24,8 °С (через 10 ч после загрузки в камеру);

– при температуре материала +44 °С (мезофильный период);

– при температуре материала +55 °С и выше (термофильный период).

Этап 3 (заключительный)

Навоз выгружался из герметичной емкости и взвешивался.

Эксперимент был проведен в трех повторностях. Статистическая обработка экспериментальных данных осуществлялась в программе Microsoft Excel. Оценка погрешности средних значений производилась с учетом критерия Стьюдента. Истинное значение математического ожидания с вероятностью P должно находиться в интервале:

$$P\left[\bar{x} \pm t_V \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right] = 1 - \alpha,$$

где $\bar{x}$ – среднее значение; t_V – табличное значение критерия Стьюдента (для уровня вероятности 0,9 значение составляет 2,92); $1 - \alpha$ – заданный уровень вероятности (для процесса переработки навоза принято значение 0,9); n – количество точек массива (для данного эксперимента $n = 3$); σ – среднеквадратичное отклонение[8].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В соответствии с первым этапом исследования был выполнен анализ проб навоза в аналитической лаборатории ИАЭП – филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (табл. 2).

[7] Портативные автоматические газоанализаторы для рабочей и жилой зоны ЭЛАН [Электронный ресурс]. URL: https://clck.ru/3P7ybu (дата обращения: 24.01.2025).

[8] Валге А. М., Джабборов Н. И., Эвиев В. А. Основы статистической обработки экспериментальных данных при проведении исследований по механизации сельскохозяйственного производства с примерами на Statgraphics и Excel : моногр. СПб. : Элиста, 2015. 140 с. https://elibrary.ru/vitiud

Таблица 2
Table 2

Качественные характеристики подстилочного навоза телят
Quality of young cattle bedding manure

Показатель / Indicator	Значение / Value
Влажность, % / Moisture content, %	70,30
NO_3^- (на нативное в-во), мг/100 г / NO_3^- (native manure), mg/100 g	36,70
NH_4 (на нативное в-во), % / NH_4 (native manure), %	0,16
N_{total} (на нативное в-во), % / N_{total} (native manure), %	1,31
Зола (на сухое в-во) /Ash (Dry matter)	10,50

В соответствии со вторым этапом были проведены замеры концентраций климатически активных веществ. В таблице 3 представлены значения концентрации в трех повторностях по четырем температурным режимам исследования и указаны верхний и нижний интервалы среднеквадратических отклонений для CO_2.

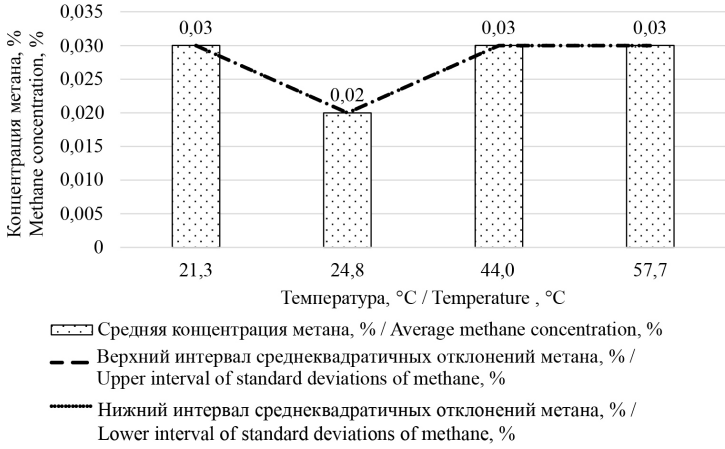
Таблица 3
Table 3

Значения концентрации для углекислого газа при разных значениях температуры навоза
Concentration of carbon dioxide under various manure temperatures

Показатель / Indicator	Значение для температуры / Concentration under			
	+21,3 °C	+24,8 °C	+44 °C	+57,7 °C
Концентрация CO_2 (повторность 1), мг/м³ / Concentration of CO_2 (replication 1), mg/m³	724	527	538	541
Концентрация CO_2 (повторность 2), мг/м³ / Concentration of CO_2 (replication 2), mg/m³	724	529	538	541
Концентрация CO_2 (повторность 3), мг/м³ / Concentration of CO_2 (replication 3), mg/m³	724	530	538	541
Средняя концентрация CO_2, мг/м³ / Mean concentration of CO_2, mg/m³	724	528,7	538	541
Верхний интервал среднеквадратичных отклонений CO_2, мг/м³ / Upper interval of standard deviation of CO_2, mg/m³	724	529,9	538	541
Нижний интервал среднеквадратичных отклонений CO_2, мг/м³ / Lower interval of standard deviation of CO_2, mg/m³	724	527,5	538	541

В исходном состоянии через час после загрузки в камеру фоновая концентрация CO_2 составляла 362 мг/м³. Через 6–18 ч после загрузки в камеру фоновая концентрация CO_2 достигала 349 мг/м³. При температуре материала в диапазоне 40–45 °C фоновая концентрация CO_2 составляла 538 мг/м³. При температуре материала в диапазоне свыше 55 °C фоновая концентрация CO_2 достигла 530 мг/м³.

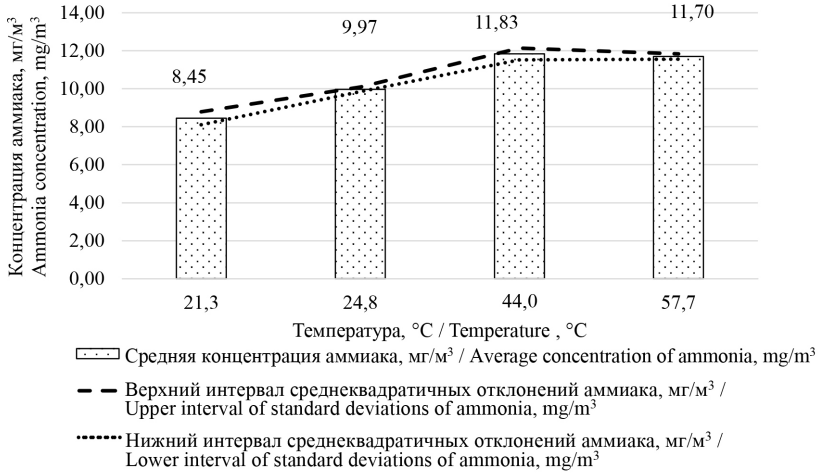
На рисунках 5–7 представлены средние значения концентрации по четырем режимам исследования и указаны верхний и нижний интервалы среднеквадратических отклонений CH_4, H_2S и NH_3 соответственно.



Р и с. 5. Значения средней концентрации метана, верхний и нижний интервалы среднеквадратических отклонений метана

F i g. 5. Mean methane concentrations, upper and lower intervals of methane standard deviations

В исходном состоянии через час после загрузки в камеру фоновая концентрация CH_4 составляла 0,03 %. Через 6–18 ч после загрузки в камеру фоновая концентрация CH_4 составляла 0,02 %. При температуре материала в диапазоне 40–45 °C фоновая концентрация CH_4 достигла 0,03 %. При температуре материала в диапазоне свыше 55 °C фоновая концентрация CH_4 составляла 0,02 %.

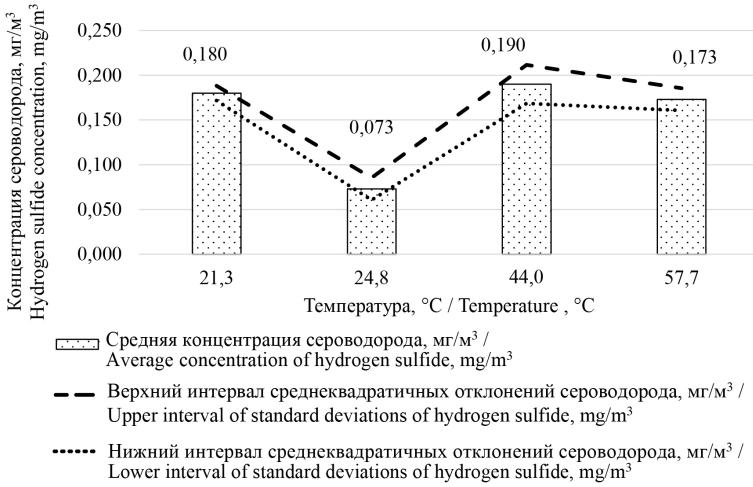


Р и с. 6. Значения средней концентрации сероводорода, верхний и нижний интервалы среднеквадратических отклонений сероводорода

F i g. 6. Mean hydrogen sulfide concentrations, upper and lower intervals of hydrogen sulfide standard deviations

В исходном состоянии через час после загрузки в камеру фоновая концентрация H_2S достигала 0,1 мг/м³. Через 6–18 ч после загрузки в камеру

фоновая концентрация H_2S составляла 0 мг/м^3. При температуре материала в диапазоне 40–45 °С фоновая концентрация H_2S достигала 0,1 мг/м^3. При температуре материала в диапазоне свыше 55 °С фоновая концентрация H_2S составляла 0,08 мг/м^3.



Р и с. 7. Значения средней концентрации аммиака, верхний и нижний интервалы среднеквадратических отклонений аммиака

F i g. 7. Mean ammonia concentrations, upper and lower intervals of ammonia standard deviations

В исходном состоянии через час после загрузки в камеру фоновая концентрация NH_3 составляла 1,34 мг/м^3. Через 6–18 ч после загрузки в камеру фоновая концентрация NH_3 достигала 0,42 мг/м^3. При температуре материала в диапазоне 40–45 °С фоновая концентрация NH_3 составляла 1,11 мг/м^3. При температуре материала в диапазоне свыше 55 °С фоновая концентрация NH_3 достигала 1,34 мг/м^3.

На рисунках 5–7 результаты измерений концентраций выбросов попадают в доверительный интервал оценки среднего значения, следовательно, данные достоверны, сомнительные точки отсутствуют. В соответствии с формулой значения средних концентраций для всех газов (CO_2, CH_4, H_2S и NH_3) находятся в пределах ошибок, следовательно, можно говорить об их достоверности.

При обработке результатов исследований было выявлено, что в зависимости от режима исследования и изменения температуры материала наиболее интенсивно изменяются показания концентрации H_2S и NH_3.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обоснована и создана лабораторная экспериментальная установка для замеров концентрации климатически активных веществ от разных видов навоза и помета. Экспериментальная установка позволяет имитировать реальные процессы, происходящие при переработке навоза и помета, – самопроизвольный разогрев перерабатываемого материала, в частности за счет его насыщения воздухом при ворошении. Данная установка апробирована на подстилочном навозе телят. Произведена имитация технологии компостирования.

Результаты исследования показали следующее:

1) концентрация углекислого газа после первых 10 ч исследования (температура сырья поднялась с +21,3 до +24,8 °С) падает с 724 до 528,7 мг/м^3, после чего возрастает до 541 мг/м^3 при разогреве до +57,7 °С. Фоновая концентрация CO_2 с момента загрузки навоза в камеру увеличилась с 362 до 530 мг/м^3;

2) концентрация метана оставалась на уровне 0,03 % независимо от времени проведения эксперимента и температуры разогрева навоза из телятника;

3) концентрация H_2S после первых 10 ч исследования (температуры сырья поднялась с +21,3 до +24,8 °С) падает с 0,18 до 0,073 мг/м^3, после чего возрастает до 0,173 мг/м^3 при разогреве до +57,7 °С. Фоновая концентрация H_2S все время исследования находилась на уровне 0,1 мг/м^3;

4) концентрация аммиака динамично увеличивалась весь период исследования с 8,447 мг/м^3 через час после загрузки до 11,7 мг/м^3 при разогреве до +57,7 °С. Фоновая концентрация NH_3 с момента загрузки навоза в камеру сначала понизилась с 1,34 до 0,42 мг/м^3, но к разогреву навоза +57,7 °С повысилась до 1,34 мг/м^3.

Оценка полученных в исследовании результатов показала сходимость с результатами других исследователей по метану: концентрация метана при эмиссии от подстилочного навоза молодняка КРС в наших исследованиях составила 0,03 % (0,3 г/кг), у китайских исследователей концентрация метана составила 2,4 г/кг от подстилочного навоза КРС на откорме [6]; ученые из Канады замеряли концентрацию метана от открытых хранилищ жидкого свиного навоза в течение всех четырех сезонов, значения были получены в диапазоне от 5 г/кг зимой до 155 г/кг летом [7].

Оценка результатов исследования показала, что в дальнейшей работе необходимо собирать большее количество исходных для возможности пересчета концентраций в выбросы и возможности дальнейшего сопоставления результатов с аналогичными зарубежными исследованиями.

В результате анализа полученных экспериментальных данных установлена следующая закономерность: после размещения исследуемого навоза в камере экспериментальной установки по истечению 10 ч навоз «приходит в состояние покоя», при этом концентрации всех исследуемых загрязняющих веществ в выбросах снижаются. Вследствие активации микроорганизмов и запуска процесса переработки методом компостирования происходит саморазогрев навоза, что сопровождается повышением концентрации загрязняющих веществ в выбросах. Данный факт подтверждает, что концентрация в выбросах имеет динамический характер и зависит от стадии переработки навоза.

В дальнейшей перспективе необходимо провести углубленные исследования материалов с увеличением кратности измерений с целью повышения репрезентативности полученных данных и разработать расчетную модель, учитывающую различные варианты технологий обращения с навозом/пометом и позволяющую перейти от полученных в результате исследований концентраций парниковых газов к удельным выбросам. Полученные закономерности и разработка расчетных моделей позволят уточнить данные Национального доклада о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов

не регулируемых Монреальским протоколом[9]. Полученные данные позволят внести вклад в разработку отечественной методики по оценке эмиссии парниковых газов от животноводства и для использования ее при получении данных, подаваемых в Национальный доклад.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пилип Л.В. Метод очистки воздуха от запахообразующих веществ свинокомплексов. *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства.* 2019;(4):137–146. https://doi.org/0.24411/0131-5226-2019-10221
2. Джабборов Н.И., Мишанов А.П., Добринов А.В. Прогнозирование выбросов парниковых газов в растениеводстве от уровня применяемых технологий. *АгроЭкоИнженерия.* 2024;(1):70–82. https://doi.org/10.24412/2713-2641-2024-1118-70-82
3. Вторый В.Ф., Вторый С.В. Влияние системы удаления навоза на концентрацию аммиака в коровниках с беспривязным содержанием. *АгроЭкоИнженерия.* 2024;(2):104–117. https://doi.org/10.24412/2713-2641-2024-2119-104-116
4. Брюханов А.Ю., Васильев Э.В., Шалавина Е.В., Уваров Р.А., Субботин И.А. Метод решения экологических проблем при обращении с навозом и пометом. *Молочнохозяйственный вестник.* 2017;(3):84–96. https://elibrary.ru/zmnsxd
5. Васильев Э.В., Шалавина Е.В. Изменение содержания азота и фосфора в жидкой фракции свиного навоза при биологической очистке. *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства.* 2014;(85):146–150. https://elibrary.ru/sydqqr
6. Kaharabata S.K., Schuepp P.H., Desjardins R.L. Methane Emissions from Above Ground Open Manure Slurry Tanks. *Global Biogeochemical Cycles.* 1998;12(3):545–554. https://doi.org/10.1029/98GB01866
7. Sommer S.G., Petersen S.O., Søgaard H.T. Greenhouse Gas Emission from Stored Livestock Slurry. *Journal of Environmental Quality.* 2000;29(3):744–751. https://doi.org/10.2134/jeq2000.00472425002900030009x
8. Hellebrand H.J., Kalk W.-D. Emission of Methane, Nitrous Oxide, and Ammonia from Dung Windrows. *Nutrient Cycling in Agroecosystems.* 2001;60:83–87. https://doi.org/10.1023/A:1012662823291
9. Berg W., Brunsch R., Pazsiczki I. Greenhouse Gas Emissions from Covered Slurry Compared with Uncovered During Storage. *Agriculture, Ecosystems & Environment.* 2006;112(2–3):129–134. https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.08.031
10. Hudson N.A., Ayoko G.A., Dunlop M.W., Duperouzel D., Burrell D., Bell K., et al. Comparison of Odour Emission Rates Measured from Various Sources Using Two Sampling Devices. *Bioresource Technology.* 2009;100(1):118–124. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.05.043
11. Zhu H., Dong H., Zuo F., Yuan F., Rao J. Effect of Covering on Greenhouse Gas Emissions from Beef Cattle Solid Manure Stored at Different Stack Heights. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering.* 2014;30:225–231. URL: https://www.ingentaconnect.com/content/tcsae/tcsae/2014/00000030/00000024/art00027;jsessionid=1krm4xm5vumnl.x-ic-live-03 (дата обращения: 01.06.2025).
12. Trabue S.L., Kerr B.J., Bearson B.L., Hur M., Parkin T., Wurtele E.S., et al. Microbial Community and Chemical Characteristics of Swine Manure During Maturation. *Journal of Environmental Quality.* 2016;45(4):1144–1152. https://doi.org/10.2134/jeq2015.09.0446
13. Powers W., Capelari M. Analytical Methods for Quantifying Greenhouse Gas Flux in Animal Production Systems. *Journal of Animal Science.* 2016;94(8):3139–3146. https://doi.org/10.2527/jas.2015-0017
14. Holly M.A., Larson R.A., Powell J.M., Ruark M.D., Aguirre-Villegas H. Greenhouse Gas and Ammonia Emissions from Digested and Separated Dairy Manure During Storage and

[9] Национальный кадастр антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990–2021 гг.

after Land Application. *Agriculture, Ecosystems & Environment.* 2017;239:410–419. https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.02.007
15. Vorobel M., Klym O., Kaplinskyi V., Ivan L., Grabovskyi S., Taras P., et al. Reduction of the Greenhouse Gas Emissions from the Pig Manure Using Inorganic Substances. *Scientific Papers. Series D. Animal Science.* 2023;(2):421–427. URL: https://animalsciencejournal.usamv.ro/pdf/2023/issue_2/Art49.pdf (дата обращения: 01.06.2025).
16. Kerr B.J., Trabue S.L., Andersen D.S., Van Weelden M.B., Pepple L.M. Dietary Composition and Particle Size Effects on Swine Manure Characteristics and Gas Emissions. *Journal of Environmental Quality.* 2020;49(5):1384–1395. https://doi.org/10.1002/jeq2.20112
17. Cattaneo M., Tayà C., Burgos L., Morey L., Noguerol J., Provolo G., et al. Assessing Ammonia and Greenhouse Gas Emissions from Livestock Manure Storage: Comparison of Measurements with Dynamic and Static Chambers. *Sustainability*. 2023;15(22):15987. https://doi.org/10.3390/su152215987
18. Фахреев Н.Н., Дыганова Р.Я. Программный комплекс оценки полигонов хранения органических отходов в птицеводческих комплексах. *Академический вестник ELPIT.* 2019;4(1):49–56. https://elibrary.ru/pbgbrj
19. Posse G., Lewczuk N., Richter K., Hilbert J. Field Measurements of Agricultural Emissions. *Bioenergy and Latin America: A Multi Country Perspective.* 2015:53–60. URL: https://www.researchgate.net/publication/304917594_Field_measurements_of_agricultural_emissions (дата обращения: 01.06.2025).
20. Pumpanen J., Kolari P., Ilvesniemi H. Minkkinen K., Vesala T., Niinistöet S., et al. Comparison of Different Chamber Techniques for Measuring Soil CO_2 Efflux. *Agricultural and Forest Meteorology.* 2004;123(3–4):159–176. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2003.12.001
21. Rochette P. Towards a Standard Non-Steady-State Chamber Methodology for Measuring Soil N_2O Emissions. *Animal Feed Science and Technology.* 2011;166–167:141–146. https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2011.04.063
22. Clough T.J., Rochette P., Thomas S.M., Pihlatie M., Christiansen J.R., Thorman R.E. Global Research Alliance N_2O Chamber Methodology Guidelines: Design Considerations. *Journal of Environmental Quality*. 2020;49(5):1081–1091. https://doi.org/10.1002/jeq2.20117
23. Fiedler J., Fuß R., Glatzel S. Hagemann U. Huth V., Jordan S., et al. Measurement of Carbon Dioxide, Methane and Nitrous Oxide Fluxes between Soil-Vegetation-Systems and the Atmosphere Using Non-Steady State Chambers. *Best Practice Guideline*. 2022. 70 p. https://doi.org/10.23689/fidgeo-5422
24. Шахматов К.Л., Орлов Т.В., Суворов Г.Г., Чередниченко О.В., Фурса Ю.В., Моченов С.Ю., и др. Апробация методов площадной оценки эмиссии парниковых газов на осушенных торфяниках Северо-Запада России с помощью GEST-подхода на примере торфяника Дедово поле. *Труды Инсторфа.* 2023;(28):10–20. https://elibrary.ru/hkerql
25. Казанцев В.С., Кривенок Л.А., Чербунина М.Ю., Котов П.И. Эмиссия парниковых газов из природных экосистем Норильского промышленного района. *Арктика и Антарктика.* 2023;(4):19–41. https://doi.org/10.7256/2453-8922.2023.4.69058

Об авторах:

Брюханов Александр Юрьевич, доктор технических наук, член-корреспондент РАН, директор института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (196634, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, п. Тярлево, Фильтровское ш., д. 3), ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4963-3821, Researcher ID: B-7550-2018, sznii@ya.ru

Васильев Эдуард Вадимович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник отдела анализа и прогнозирования экологической устойчивости агроэкосистем института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (196634, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, п. Тярлево, Фильтровское ш., д. 3), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5910-5793, Researcher ID: C-1304-2018, sznii6@yandex.ru

Базыкин Валентин Игоревич, научный сотрудник отдела анализа и прогнозирования экологической устойчивости агроэкосистем института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (196634, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, п. Тярлево, Фильтровское ш., д. 3), ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6417-6433, Researcher ID: P-4694-2015, valentin-bazykin@mail.ru

Шалавина Екатерина Викторовна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела анализа и прогнозирования экологической устойчивости агроэкосистем института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (196634, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, п. Тярлево, Фильтровское ш., д. 3), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7345-1510, Researcher ID: C-1980-2018, shalavinaev@mail.ru

Вклад авторов:

А. Ю. Брюханов – контроль, лидерство и наставничество в процессе планирования и проведения исследования.

Э. В. Васильев – формулирование идеи исследования, целей и задач; разработка методологии исследования.

В. И. Базыкин – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор данных.

Е. В. Шалавина – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор данных; создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования и полученных данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила в редакцию 07.02.2025; поступила после рецензирования 25.02.2025; принята к публикации 06.03.2025

REFERENCES

1. Pilip L.V. Method of Air Cleaning from Odor-Forming Substances Originating From Pig Complexes. *Tekhnologii i Tekhnicheskie Sredstva Mekhanizirovannogo Proizvodstva Produkcii Rastenievodstva i Zhivotnovodstva*. 2019;(4):137–146. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/0.24411/0131-5226-2019-10221
2. Dzhabborov N.I., Mishanov A.P., Dobrinov A.V. Forecasting of Greenhouse Gas Emissions in Crop Production Depending on Applied Technology Level. *AgroEcoEngineering.* 2024;(1):70–82 (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.24412/2713-2641-2024-1118-70-82
3. Vtoryi V.F., Vtoryi S.V. Effect of Manure Removal System on Ammonia Concentration in Loose Housing Barns. *AgroEcoEngineering*. 2024;(2):104–117. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.24412/2713-2641-2024-2119-104-116
4. Bryukhanov A.Yu., Vasilev E.V., Shalavina E.V., Uvarov R.A., Subbotin I.A. Method of Environmental Problem Solution in Manure Management. *Molochnokhozyaistvenny Vestnik.* 2017;(3):84–96. (In Russ., abstract in Eng.) https://elibrary.ru/zmnsxd
5. Vasilev E.V., Shalavina E.V. Change in Nitrogen and Phosphorus Content During Biological Treatment of Liquid Fraction of Pig Manure. *Tekhnologii i Tekhnicheskie Sredstva Mekhanizirovannogo Proizvodstva Produkcii Rastenievodstva i Zhivotnovodstva*. 2014;(85):146–150. (In Russ., abstract in Eng.) https://elibrary.ru/sydqqr
6. Kaharabata S.K., Schuepp P.H., Desjardins R.L. Methane Emissions from Above Ground Open Manure Slurry Tanks. *Global Biogeochemical Cycles*. 1998;12(3):545–554. https://doi.org/10.1029/98GB01866

7. Sommer S.G., Petersen S.O., Søgaard H.T. Greenhouse Gas Emission from Stored Livestock Slurry. *Journal of Environmental Quality*. 2000;29(3):744–751. https://doi.org/10.2134/jeq2000.00472425002900030009x
8. Hellebrand H.J., Kalk W.-D. Emission of Methane, Nitrous Oxide, and Ammonia from Dung Windrows. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 2001;60:83–87. https://doi.org/10.1023/A:1012662823291
9. Berg W., Brunsch R., Pazsiczki I. Greenhouse Gas Emissions from Covered Slurry Compared with Uncovered During Storage. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2006;112(2–3):129–134. https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.08.031
10. Hudson N.A., Ayoko G.A., Dunlop M.W., Duperouzel D., Burrell D., Bell K., et al. Comparison of Odour Emission Rates Measured from Various Sources Using Two Sampling Devices. *Bioresource Technology*. 2009;100(1):118–124. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.05.043
11. Zhu H., Dong Heming, Zuo F., Yuan F., Rao J. Effect of Covering on Greenhouse Gas Emissions from Beef Cattle Solid Manure Stored at Different Stack Heights. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. 2014;30:225–231. Available at: https://www.ingentaconnect.com/content/tcsae/tcsae/2014/00000030/00000024/art00027;jsessionid=1krm4xm5vumnl.x-ic-live-03 (accessed 01.06.2025).
12. Trabue S.L., Kerr B.J., Bearson B.L., Hur M., Parkin T., Wurtele E.S., et al. Microbial Community and Chemical Characteristics of Swine Manure During Maturation. *Journal of Environmental Quality*. 2016;45(4):1144–1152. https://doi.org/10.2134/jeq2015.09.0446
13. Powers W., Capelari M. Analytical Methods for Quantifying Greenhouse Gas Flux in Animal Production Systems. *Journal of Animal Science*. 2016;94(8):3139–3146. https://doi.org/10.2527/jas.2015-0017
14. Holly M.A., Larson R.A., Powell J.M., Ruark M.D., Aguirre-Villegas H. Greenhouse Gas and Ammonia Emissions from Digested and Separated Dairy Manure During Storage and after Land Application. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2017;239:410–419. https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.02.007
15. Vorobel M., Klym O., Kaplinskyi V., Ivan L., Grabovskyi S., Taras P., et al. Reduction of the Greenhouse Gas Emissions from the Pig Manure Using Inorganic Substances. *Scientific Papers. Series D. Animal Science*. 2023;(2):421–427. Available at: https://animalsciencejournal.usamv.ro/pdf/2023/issue_2/Art49.pdf (accessed 01.06.2025).
16. Kerr B.J., Trabue S.L., Andersen D.S., Van Weelden M.B., Pepple L.M. Dietary Composition and Particle Size Effects on Swine Manure Characteristics and Gas Emissions. *Journal of Environmental Quality*. 2020;49(5):1384–1395. https://doi.org/10.1002/jeq2.20112
17. Cattaneo M., Tayà C., Burgos L., Morey L., Noguerol J., Provolo G., et al. Assessing Ammonia and Greenhouse Gas Emissions from Livestock Manure Storage: Comparison of Measurements with Dynamic and Static Chambers. *Sustainability*. 2023;15(22):15987. https://doi.org/10.3390/su152215987
18. Fakhreev N.N., Dyganova R.Ya. [Program Complex of Assessment of Organic Waste Storage Landfills in Poultry Farms]. *Academic Bulletin ELPIT*. 2019;4(1):49–56. (In Russ.) https://elibrary.ru/pbgbrj
19. Posse G., Lewczuk N., Richter K., Hilbert J. Field Measurements of Agricultural Emissions. *Bioenergy and Latin America: A Multi Country Perspective.* 2015:53–60. Available at: https://www.researchgate.net/publication/304917594_Field_measurements_of_agricultural_emissions (accessed 01.06.2025).
20. Pumpanen J., Kolari P., Ilvesniemi H. Minkkinen K., Vesala T., Niinistöet S., et al. Comparison of Different Chamber Techniques for Measuring Soil CO_2 Efflux. *Agricultural and Forest Meteorology.* 2004;123(3–4):159–176. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2003.12.001
21. Rochette P. Towards a Standard Non-Steady-State Chamber Methodology for Measuring Soil N_2O Emissions. *Animal Feed Science and Technology*. 2011;166–167:141–146. https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2011.04.063

22. Clough T.J., Rochette P., Thomas S.M., Pihlatie M., Christiansen J.R., Thorman R.E. Global Research Alliance N_2O Chamber Methodology Guidelines: Design Considerations. *Journal of Environmental Quality*. 2020;49(5):1081–1091. https://doi.org/10.1002/jeq2.20117
23. Fiedler J., Fuß R., Glatzel S. Hagemann U. Huth V., Jordan S., et al. Measurement of Carbon Dioxide, Methane and Nitrous Oxide Fluxes between Soil-Vegetation-Systems and the Atmosphere Using Non-Steady State Chambers. *Best Practice Guideline.* 2022. 70 p. https://doi.org/10.23689/fidgeo-5422
24. Shakhmatov K.L., Orlov T.V., Suvorov G.G., Cherednichenko O.V., Fyrsa Yu.V., Mochenov S.Yu., et al. Approbation of Methods for Area Assessment of Greenhouse Gas Emissions on Drained Peatlands in the North West of Russia Using the Gest Approach on the Example of the Dedovo Pole Peatland. *Trudy Instorfa*. 2023;(28):10–20. (In Russ., abstract in Eng.) https://elibrary.ru/hkerql
25. Kazantsev, V.S., Krivenok, L.A., Cherbunina, M.Y., Kotov, P.I. Greenhouse Gas Emissions from Natural Ecosystems of the Norilsk Industrial District. *Arctic and Antarctica*. 2023;(4):19–41. (In Russ., abstract in Eng.)https://doi.org/10.7256/2453-8922.2023.4.69058

About the authors:

Aleksandr Yu. Briukhanov, Dr.Sci. (Eng.), Corresponding Member of Russian Academy of Sciences, Director, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) – branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoje Shosse, Tiarlevo, St. Petersburg 196634, Russian Federation), ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4963-3821, Researcher ID: B-7550-2018, sznii@ya.ru

Eduard V. Vasilev, Cand.Sci. (Eng.), Leading Researcher of the Department of Analysis and Forecasting of Environmental Sustainability of Agroecosystems, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) – branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoje Shosse, Tiarlevo, St. Petersburg 196634, Russian Federation), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5910-5793, Researcher ID: C-1304-2018, sznii6@yandex.ru

Valentin I. Bazykin, Researcher of the Department of Analysis and Forecasting of Environmental Sustainability of Agroecosystems, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) – branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoje Shosse, Tiarlevo, St. Petersburg 196634, Russian Federation), ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6417-6433, Researcher ID: P-4694-2015, valentin-bazykin@mail.ru

Ekaterina V. Shalavina, Cand.Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Department of Analysis and Forecasting of Environmental Sustainability of Agroecosystems, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) – branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoje Shosse, Tiarlevo, St. Petersburg 196634, Russian Federation), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7345-1510, Researcher ID: C-1980-2018, shalavinaev@mail.ru

Authors contribution:

A. Yu. Briukhanov – oversight and leadership responsibility for planning and conducting the study, including mentorship external to the core team.

E.V. Vasilev – formulating the study ideas, aims and objectives; developing the study methodology.

V. I. Bazykin – conducting the study, specifically performing the experiments or collecting data.

E. V. Shalavina – conducting the study, specifically performing the experiments, or collecting data; preparing and presenting the manuscript, specifically visualizing the study results and the obtained data.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 07.02.2025; revised 25.02.2025; accepted 06.03.2025

https://vestnik.mrsu.ru ISSN 2658-4123, eISSN 2658-6525

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ / TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT

https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202503.489-512
EDN: https://elibrary.ru/bhcaov
УДК 630*424.6
Оригинальная статья / Original article

Эффективность дифференцированного внесения азотных удобрений с использованием модели искусственного интеллекта

Е. В. Труфляк[1] ✉, **Л. В. Рагозин**[2]
[1] *Кубанский государственный аграрный университет, г. Краснодар, Российская Федерация*
[2] *Группа компаний «Прогресс Агро», г. Усть-Лабинск, Российская Федерация*
✉ *trufliak@mail.ru*

Аннотация

Введение. Озимая пшеница – ключевая зерновая культура, продуктивность которой во многом определяется оптимальным азотным питанием. Оптимизация азотного питания озимой пшеницы в современных условиях крупного агрохолдинга требует дифференцированного внесения удобрений, однако агрономы сталкиваются с проблемой выбора доз и отсутствием комплексных, валидированных методик применительно к большому количеству полей. Существующие подходы не учитывают всего спектра факторов, что затрудняет принятие решений. Разработка методов валидации и моделей искусственного интеллекта для дифференцированного внесения азотных удобрений критически актуальна для повышения продуктивности и эффективности возделывания озимой пшеницы. Проблемой является отсутствие методов валидации и модели дифференцированного внесения азотных удобрений в работе нейросети для оптимизации процессов возделывания озимой пшеницы и повышения производительности сельскохозяйственных угодий.

Цель исследования. Разработка и внедрение технологии дифференцированного внесения азотных удобрений для оптимизации процессов возделывания озимой пшеницы.

Материалы и методы. Выполнялся сравнительный полевой эксперимент на полях АО «Рассвет» Усть-Лабинского района Краснодарского края дифференцированного внесения азотных удобрений (две подкормки). Для проведения исследований выбраны два поля с озимой пшеницей площадью 83 и 68 га. Каждое поле было разделено на три варианта: российская схема – в зону низкой продуктивности вносилось больше удобрений, европейская схема – в зону низкой продуктивности вносилось меньше удобрений, хозяйственная схема – единая доза удобрений. Разрабатывалась LSTM-модель на основе усредненных вегетационных индексов (EVI, NDWI, REP, SR) со спутниковых снимков Sentinel-2 за девять месяцев. Для увеличения обучающей выборки была предпринята попытка синтезирования данных на пиксельном уровне, а итоговые прогнозы продуктивности сглаживались и конвертировались в карты-

© *Труфляк Е. В., Рагозин Л. В., 2025*

Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

задания для дифференцированного внесения удобрений с нормами, рассчитанными по исторической корреляции. Лабораторные исследования отбора растений проводились в Кубанском ГАУ и на опытной станции учебно-опытного хозяйства «Кубань». Объектом исследования являлся технологический процесс дифференцированного внесения удобрений по модели искусственного интеллекта и его влияние на вегетацию, урожайность и качественные показатели озимой пшеницы.

Результаты исследования. Диапазон урожайности озимой пшеницы (комбайновой и биологической) по российской схеме на первом поле составил 90,9...101,5 ц/га; европейской схеме – 89,2...96,4 ц/га; хозяйственной схеме – 89,9...90,9 ц/га. На втором поле соответственно 87,4...99,6 ц/га; 92,4...98,5 ц/га; 87,8...93,6 ц/га. Усредненная урожайность по первому полю выше на 6,31 % по российской схеме и на 2,56 % по европейской схеме по сравнению с хозяйственной схемой. По второму полю выше на 5,25 % по европейской и на 3,08 % по российской по сравнению с хозяйственной схемой. Практически все исследованные варианты можно отнести к 3-му классу зерна. Увеличение натуры прямо пропорционально снижению содержания протеина и клейковины по обоим полям вариантов искусственного интеллекта. Содержание протеина по всем вариантам искусственного интеллекта (кроме варианта европейской схемы второго поля) ниже на 0,23–1,5 %. Содержание клейковины по всем вариантам искусственного интеллекта (кроме варианта европейской схемы второго поля) ниже на 0,53–3,3 %. Натура по вариантам искусственного интеллекта выше на 0,33–1,6 %. Содержание клейковины по всем вариантам искусственного интеллекта (кроме варианта европейской схемы второго поля) ниже на 0,53–3,3 %.

Обсуждение и заключение. Экономический анализ хозяйства по комбайновой урожайности показал, что при использовании европейской технологии производственные затраты снизились на 400 тыс. руб. по сравнению с контрольной схемой, а затраты на удобрения уменьшились на 2 567 руб. с одного гектара. Выручка с одного гектара увеличилась на 6 401 руб. и условной прибыли на 9 546 руб. Валовая прибыль также увеличилась на 150 тыс. руб., а рентабельность выросла на 5,3 % по сравнению с контрольной схемой. Результаты предложенных методов валидации и созданной модели дифференцированного внесения азотных удобрений использовались в работе нейросети. Эффективность работы нейросети оценена в реальных условиях сельского хозяйства по урожайности путем создания шкалы работы по отношению с существующими методами внесения удобрений (повышение урожайности от 2,56 до 6,31 %). Представленные результаты полевых экспериментов демонстрируют высокую практическую значимость предложенной технологии дифференцированного внесения азотных удобрений, которая требует проверки производственных испытаний на большем количестве полей. Перспективы исследования включают дальнейшее расширение площади применения разработанной технологии и ИИ-модели. Дальнейшее совершенствование нейросетевой модели предполагает интеграцию более широкого спектра динамических данных и использование ее не только на азотной подкормке, но и основном внесении удобрений. Это позволит повысить адаптивность модели к изменяющимся условиям вегетации и принимать управленческие решения в более короткие сроки. В конечном итоге, данное исследование закладывает основу для создания комплексных цифровых платформ управления агроценозами, где ИИ-модели будут играть ключевую роль в оптимизации всех этапов сельскохозяйственного производства.

Ключевые слова: дифференцированное внесение удобрений, NDVI, искусственный интеллект

Благодарности: авторы благодарят за поддержку при реализации проекта фонд Сколково и ООО «ПрофАгро».

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Труфляк Е.В., Рагозин Л.В. Эффективность дифференцированного внесения азотных удобрений с использованием модели искусственного интеллекта. *Инженерные технологии и системы.* 2025;35(3):489–512. https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202503.489-512

Efficiency of Variable Rate Application of Nitrogen Fertilizers Using Artificial Intelligence Model

E. V. Truflyak[a] ✉, **L. V. Ragozin**[b]
[a] *Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russian Federation*
[b] *Group of Companies "Progress Agro", Ust-Labinsk, Russian Federation*
✉ *trufliak@mail.ru*

Abstract

Introduction. Winter wheat is a key grain crop, the productivity of which is largely determined by optimal nitrogen nutrition. Optimization of nitrogen nutrition for winter wheat in modern conditions of a large agroholding requires variable rate fertilizer application, however, agronomists face the problem of selecting doses and the lack of comprehensive, validated methods for a large number of fields. Existing approaches do not take into account the full range of factors that complicates decision-making process. The development of validation methods and artificial intelligence models for variable rate application of nitrogen fertilizers is critically important for increasing productivity and efficiency of winter wheat cultivation. The problem is that in the neural network, there are not validation methods and a model for variable rate application of nitrogen fertilizers to optimize the processes of cultivation of winter wheat and increase the agricultural land productivity.

Aim of the Study. The study is aimed at developing and introducing a technology for variable rate application of nitrogen fertilizers to optimize the processes of winter wheat cultivation.

Materials and Methods. On the fields of JSC Rassvet in the Ust-Labinsk district of the Krasnodar Territory, there was performed comparative field experiment for the variable rate application of nitrogen fertilizers (two top dressings). Two fields with 83 and 68 hectares of winter wheat were selected for the study. Each field was divided into 3 variants: the Russian scheme is when more fertilizers were applied to the zone of low productivity, the European scheme is when less fertilizers were applied to the zone of low productivity, and the economic scheme is when a single dose of fertilizers was applied. An LSTM model was developed based on the average vegetation indexes (EVI, NDWI, REP, SR) from Sentinel-2 satellite images obtained during nine months. To increase the training sample, there was made an attempt to synthesize the data at the pixel level; the final productivity forecasts were smoothed and converted into job cards for variable rate application of fertilizers with norms calculated based on historical correlation. Laboratory studies of plant selection were conducted at the Kuban State Agrarian University (Department of Operation and Technical Service and at the experimental station of the Kuban experimental farm). The object of the study was the technological process of variable rate application of fertilizers based on the artificial intelligence model and its impact on vegetation, yield and quality indicators of winter wheat.

Results. The actual winter wheat yields (combine and biological) under the Russian scheme on the first field was 90.9...101.5 c/ha; European scheme – 89.2...96.4 c/ha; economic scheme – 89.9...90.9 c/ha. On the second field respectively 87.4...99.6 c/ha; 92.4...98.5 c/ha; 87.8...93.6 c/ha. The average yield on the first field is higher by 6,31 % on the Russian scheme and by 2,56% on the European scheme in comparison with the economic scheme; on the second field is higher by 5,25% on the European scheme and by 3,08 % on the Russian scheme in comparison with the economic scheme. Almost all the studied variants can be attributed to the 3rd statutory grade. The increase in grain-unit is directly proportional to the decrease in protein and gluten content in both fields of AI variants. Protein content for all AI variants (except for the variant of European scheme on the second field) is 0.23–1.5% less. Gluten content is 0.53–3.3% less in all AI variants (except for the European variant of the second field). The grain-unit of the AI variants is 0.33–1.6% more. Gluten content is 0.53–3.3% less for all AI variants (except for the European variant on the second field).

Discussion and Conclusion. Economic analysis of the farm on yield of grain when combine harvesting showed that when using European technology, production costs decreased by 400 thousand rubles compared to the control scheme, and fertilizer costs decreased by 2 567 rubles per one hectare. Revenue from one hectare increased by 6 401 rubles and attributable profit by 9 546 rubles. Gross profit also increased by 150 thousand rubles, and profitability increased by 5.3% compared to the control scheme. The results of the proposed validation methods and created model of variable rate application of nitrogen fertilizers were used in the work of neural network. Under real agricultural conditions, there was evaluated the efficiency of the neural network in terms of yield by creating a scale of performance in relation to existing methods of fertilizer application (increase in yield from 2.56 to 6.31%). The presented results of field experiments demonstrate the high practical significance of the proposed technology for variable rate application of nitrogen fertilizers, which requires cheching the results of farm tests on a larger number of fields. The study prospects include further expansion of the application area for the developed technology and AI model. Further improvement of the neural network model involves the integration of a wider range of dynamic data and its use not only for nitrogen fertilization, but also for basic fertilization. This will increase the adaptability of the model to changing vegetation conditions and make management decisions in a shorter time. The study lays the foundation for the creation of integrated digital agrocenosis management platforms, where AI models will play a key role in optimizing all stages of agricultural production.

Keywords: variable fertilizer application, NDVI, artificial intelligence

Acknowledgements: The project was implemented with the support of the Skolkovo Foundation and ProfAgro LLC.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

For citation: Truflyak E.V., Ragozin L.V. Efficiency of Variable Rate Application of Nitrogen Fertilizer Using Artificial Intelligence Model. *Engineering Technologies and Systems.* 2025;35(3):489–512. https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202503.489-512

ВВЕДЕНИЕ

Для вегетации озимой пшеницы важное значение в минеральном питании имеет азот. В основе точного земледелия лежит дифференцирование удобрений, в том числе азотных, в рамках конкретного поля[1].

В настоящее время существуют следующие способы дифференцированного внесения удаобрений: онлайн (используются азотные сканеры); офлайн (используются карты-задания на основе данных продуктивности, агрохимобследования почв, картирования урожайности, индексов вегетации, электропроводности почв и др.). Наибольшее распространение получил последний способ, когда в создании карт-заданий и приятии решения по дозам внесения принимает участие специалист (агроном, агрохимик и др.). При этом возникает затруднение – в «слабую» зону нужно вносить больше или меньше удобрений.

Несмотря на многочисленные отечественные и зарубежные исследования в данной сфере, существует проблема выбора методики создания карт-задания с учетом правильности расчета доз удобрений, которые подкреплены достоверными комплексными данными для соответствующей природно-климатической зоны.

[1] Якушев В. П. Актуальная проблема информационного обеспечения современного земледелия, новые методы и технологии, направленные на ее решение // Тенденции развития агрофизики: от актуальных проблем земледелия и растениеводства к технологиям будущего: материалы IV Междунар. науч. конф. (13–15 сентября, 2023 г., г. Санкт-Петербург). СПб. : Агрофизический научно-исследовательский институт, 2023. С. 33–38. https://elibrary.ru/ilsckc

При этом важен комплексный подход учета факторов: продуктивности, агрохимического обследования почв, плодородия почв, севооборота, урожайности культур, зависимости «доза внесения удобрений – урожайность», архивных метеоданных, индексов вегетации и др. Учесть все эти факторы агроному при принятии решении о дозе внесения по каждому полю является затруднительным.

Актуальными задачами являются обоснование методов валидации и модели искусственного интеллекта (ИИ) дифференцированного внесения азотных удобрений при возделывании озимой пшеницы с использованием для сравнения трех технологии производства: контрольной (хозяйственная схема или схема агронома); отечественной («низкая продуктивность – больше удобрений») и европейской («низкая продуктивность – меньше удобрений»).

Проблемой является отсутствие методов валидации и модели дифференцированного внесения азотных удобрений в работе нейросети для оптимизации процессов возделывания озимой пшеницы и повышения производительности сельскохозяйственных угодий.

Целью работы является разработка и внедрение технологии дифференцированного внесения азотных удобрений для оптимизации процессов возделывания озимой пшеницы.

Задачи: выбор однородных по продуктивности полей для проведения сравнительного эксперимента; разработка модели ИИ на базе архитектуры LSTM с использованием мультиспектральных спутниковых индексов в условиях ограниченности и недостаточной детализации обучающих данных; апробация полученной модели при технологическом процессе дифференцированного внесения удобрений и анализ его влияния на вегетацию, урожайность и качественные показатели озимой пшеницы.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Эффективность дифференцированного внесения удобрений зависит от правильности расчета доз удобрений. В работе [1] предложен алгоритм расчета оптимальных доз удобрений для построения электронных карт на основе вариабельности значений плодородия почвы и функций отзывчивости.

Электронные карты для бортовых компьютеров разбрасывателей удобрений строятся на основе анализа карт продуктивности и урожайности, вегетации, заданий по отбору проб почвы, карт текстуры и тестов почвы, снимков с дронов.

Технологии дифференцированного внесения удобрений осуществляются специальными машинами, содержащими устройство для изменения подачи материала по электронной карте-заданию. В исследовании В. А. Смелика и др.[2] представлена блок-схема модели управления такого устройства.

Рассмотрим эффективность дифференцированного внесения удобрений в различных регионах по результатам анализа научных работ. При возделывании яровой пшеницы в Новосибирской области получена высокая зависимость урожайности

[2] Смелик В. А., Цыганова Н. А., Теплинский И. З. Обоснование дифференцированных доз внесения минеральных удобрений как основа управления технологическими машинами в точном земледелии // Сборник научных докладов ВИМ. 2010. Т. 2. С. 714–720. https://elibrary.ru/ozamux

от среднего уровня плодородия и всхожести семян[3]. При недостаточном влагообеспечении увеличение дозы удобрений в зоне высокого плодородия снижает урожайность. В Алтайском крае при возделывании яровой пшеницы в 2022–2023 гг. различия средней биологической урожайности в 2,5–3 раза больше, чем при вариациях нормы посева семян и доз удобрений [2]. В Костанайском районе Республики Казахстан промежуточное внесение азотных удобрений с последующим припосевным внесением фосфора в зоны высокой продуктивности повысило урожайность на 127 %[4].

Исследования [3] по формированию зерна яровой пшеницы высокого качества за счет дифференцированного внесения удобрений проводились в северной лесостепи Тюменской области. Такая технология позволила получить зерно яровой пшеница первого класса, увеличение белка составило 0,47 %, сырой клейковины – 5,70 %, стекловидности – 3,00 %.

Дифференцированное внесение удобрений с использованием геоинформационных технологий показало эффективность в лесостепи Новосибирского Приобья [4]. Прибавка урожая яровой пшеницы составила 24–34 %. В Омской области прибавка урожая достигла 14–23 %, белок вырос на 0,92–1,03 %[5].

В работе [5] представлен алгоритм управления азотным режимом на основе гиперспектрального зондирования и определения участков с дефицитом азота.

Для расчета доз удобрений разработана база[6] со сведениями о содержании фосфора, калия и азота по элементарным участкам 5–7 га. База содержит карты в виде векторных слоев.

Программы создают карты по данным с беспилотных летательных аппаратов и со спутников в результате анализа вегетационных индексов[7] [6].

Проведенные нами исследования в учебно-опытном хозяйстве «Краснодарское» Кубанского ГАУ [7], сравнения онлайн- и офлайн-технологий показали снижение использования минеральных удобрений на 16 кг/га, повышение содержания клейковины в зерне на 2,3 %, содержание белка на 0,6 % при онлайн-технологии.

---

[3] Беляев В. И., Тагильцев А. В., Соколова Л. В. Агрономическая эффективность применения дифференцированного способа внесения семян и удобрений на яровой пшенице // Аграрная наука – сельскому хозяйству : сб. материалов XIX Междунар. науч.-практ. конф. (8–9 февраля 2024 г., г. Барнаул). Барнаул : Алтайский государственный аграрный университет, 2024. С. 161–163. https://elibrary.ru/ryghkl

[4] Производственное испытание дифференцированного внесения минеральных удобрений при возделывании яровой пшеницы / С. А. Тулькубаева [и др.] // Актуальные вопросы растениеводства и кормопроизводства : сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. (28 февраля 2024 г., г. Кинель). Кинель : ИБЦ Самарского ГАУ, 2024. С. 131–139. https://www.elibrary.ru/aynhwr

[5] Влияние дифференцированного внесения азотных удобрений на урожайность и качество зерна яровой пшеницы / Н. Ф. Балабанова [и др.] // Инновационные технологии в земледелии и растениеводстве : сб. науч. статей, посвящ. 70-летию д-р с.-х. н. Юшкевича Леонида Витальевича (25 октября 2022 г., г. Омск). Омск : ФГБНУ «Омский аграрный научный центр», 2022. С. 10–16. https://elibrary.ru/hhqrdi

[6] Сахабиев И. А., Смирнова Е. В., Гиниятуллин К. Г. База данных агрохимического обследования пахотных угодий для дифференцированного внесения удобрений : свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2023620787 Российская Федерация. № 2023620367 ; заявл. 13.02.2023 ; опубл. 03.03.2023. https://elibrary.ru/wmauyk

[7] Ботвич И. Ю., Емельянов Д. В. Построение карт-заданий для дифференцированного внесения азотных удобрений по беспилотным и спутниковым данным : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023688068 Российская Федерация. № 2023685918 ; заявл. 30.11.2023 ; опубл. 20.12.2023. https://elibrary.ru/goksmy

В работе [8] нами предложен алгоритм обработки снимков анализа растений риса полученных с камер беспилотных летательных аппаратов, разработанный нами в Федеральном научном центре риса. Алгоритм выполнен в программе Mathcad, с помощью которой определялось среднее значение кода плотности тона изображения.

Исследования, выполненные нами в Кущевском районе Краснодарского края (АО фирма «Агрокомплекс» имени Н. И. Ткачева»), показали преимущества дифференцированного внесения удобрений[8]. Съемка с последующим созданием карты-задания осуществлялась беспилотником мультироторного типа Phantom 4 Pro с камерой RGB. В результате урожайность озимой пшеницы на опытном участке составила на 6 % выше по сравнению с контрольным.

Проведена апробация внесения азотных удобрений агродроном Agras T10 при возделывании опытных делянок озимого ячменя в учебно-опытном хозяйстве «Кубань» Кубанского ГАУ [9]. В результате урожайность повысилась на 3,6 % при снижении затрат на удобрения 2 %.

На основании проведенного обзора можно утверждать, что присутствует интерес со стороны науки и производства к дифференцированным технологиям при внесении удобрений в различных регионах Российской Федерации с доказанным экономическим эффектом. По данным Росстата с 2015 по 2022 г. заметна динамика ежегодного увеличения внесения азотных удобрений на 69 % в сельскохозяйственных организациях без учета микропредприятий. Анализируя статистику за 2018–2022 гг., можно заметить рост как по внесению удобрений (47 %), так и по полученной урожайности (26 %).

При изучении влияния минеральных удобрений на урожайность зерновых и зернобобовых культур были выявлены высокий уровень корреляции и значение ожидаемой прибыли от 1 руб. вложенных средств в удобрения на уровне 0,8–3,7 руб. (если использовать средние цены на минеральные удобрения и стоимость реализованной продукции в Нижегородской области)[9].

Рассмотрим наиболее распространенные системы с возможностью создания карт для дифференцированного внесения удобрений. Среди цифровых сервисов для сельского хозяйства наибольшее распространение имеют «История поля», «Агросигнал», Cropwise, OneSoil, ExactFarming[10] и др.

Для дифференцированного внесения удобрений используются зарубежные сервисы, например, FarmCalculators, Fertilizer Removal. Agrio[11] – программа на основе малой нейронной сети, способная выявлять болезни растений, связанные

[8] Труфляк Е. В. Цифровые технологии в сельском хозяйстве и городской среде : учебник для вузов. СПб. : Лань, 2024. 448 с.

[9] Оценка влияния вносимых удобрений на урожайности различных культур в разрезе субъектов РФ [Электронный ресурс]. URL: https://stratanda.pro (дата обращения: 21.10.2024).

[10] История поля [Электронный ресурс] : сайт. URL: https://info.agrohistory.com/ (дата обращения: 21.10.2024); Агросигнал [Электронный ресурс] : сайт. URL: https://agrosignal.com (дата обращения: 21.10.2024); Cropwise [Электронный ресурс] : сайт. URL: https://www.syngenta.ru/cropwise (дата обращения: 21.10.2024); OneSoil [Электронный ресурс] : сайт. URL: https://onesoil.ai/ru (дата обращения: 21.10.2024); ExactFarming [Электронный ресурс] : сайт. URL: https://exactfarming.com (дата обращения: 21.10.2024).

[11] Agrio [Электронный ресурс]: сайт. URL: https://agrio.app/agrio-protect-your-crops-harvest-more-ru (дата обращения: 21.10.2024).

с вредителями и недостатком питательных веществ. Программа Lab-Soil[12] помогает рассчитывать дозы для внесения удобрений на основе химического анализа почвы.

Российская платформа «АгроМон»[13] позволяет рассчитывать нормы макро- (N, P, K) и мезоэлементов (S, Ca, Mg) на основе прогнозируемого урожая. Программа «Агроинтегратор»[14] используется для ведения учета обрабатываемых площадей, подбирает оптимальный севооборот, удобрения и средства защиты растений.

Исследователями предпринимаются попытки использования нейросети для получения моделей внесения удобрений. В работе зарубежных авторов [10] представлена модель глубокого обучения для расчета и прогнозирования дифференцированного внесения удобрений (N, P и K) при выращивании капусты. Значение прогноза и рекомендуемого количества вносимого удобрения меняется с применением в нейросети различных передаточных функций.

Ученые из США и Ирака [11] описали технологию интеллектуального внесения подкормок (наноудобрения и удобрения с контролируемым или замедленным действием).

Рекуррентные нейросети (RNN) находят применение в сельском хозяйстве для решения различных задач: прогнозирования урожайности (анализ ретроспективных данных о погоде, почвенных условиях и др.); мониторинга вегетации растений (отслеживание состояния растений и выявление болезней с помощью сенсоров); оптимизации полива (анализ данных о влажности почвы, погодных условиях и др.).

Ключевые особенности LSTM (*long short-term memory*), которые делают ее подходящей для этой сферы: 1) ячейка памяти позволяет сохранять важную информацию о состоянии растений, погодных условиях и др., что важно для прогнозирования урожайности; 2) входные, выходные и забывающие гейты контролируют, какая информация сохраняется или игнорируется, что позволяет управлять данными, учитывая сезонные изменения или временные колебания в урожайности; 3) может учитывать данные, находящиеся на большом расстоянии во времени, что важно для анализа влияния прошлых условий на текущие результаты, например, как погодные условия в прошлом сезоне влияют на текущий урожай; 4) может работать с неполными или зашумленными данными, что актуально в условиях, когда данные о состоянии растений или погоде могут быть неполными.

Статьи [12–14] описывают работу беспилотных летательных аппаратов в аграрном секторе. С помощью данных машин специалисты делают мультиспектральные снимки засеянных полей и пространственное картирование влажности почвы [15–17]. Несомненный плюс в использовании беспилотников – широкий спектр выполняемых работ (от составления простых карт участков до точечного разбрасывания удобрения и опрыскивания растений).

На данный момент отсутствуют производственно-проверенные системы, позволяющие на основе анализа данных о хозяйстве принимать решения о дозах и зонах при дифференцированном основном внесении и подкормке на основе

[12] Lab-Soil [Электронный ресурс] : сайт. URL: https://lab-soil.com (дата обращения: 21.10.2024).
[13] АгроМон [Электронный ресурс] : сайт. URL: https://agromon.ru (дата обращения: 21.10.2024).
[14] Агроинтегратор [Электронный ресурс] : сайт. URL: https://www.agrointegrator.ru/mobile-app (дата обращения: 21.10.2024).

моделей ИИ без агронома и агрохимика [18]. Эффективность дифференцированного внесения азотных удобрений с использованием модели ИИ является актуальным направлением исследований.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Сравнительный полевой эксперимент дифференцированного внесения азотных удобрений (первая и вторая подкормки) выполнялся на полях АО «Рассвет» Усть-Лабинского района Краснодарского края. Для проведения исследований были выбраны два поля однородной продуктивности с озимой пшеницей площадью 83 и 68 га. Каждое поле было разделено на три варианта: российская схема – в зону низкой продуктивности вносилось больше удобрений, европейская схема – в зону низкой продуктивности вносилось меньше удобрений, хозяйственная схема – единая доза удобрений. В течение всей вегетации проводился анализ наземных частей растений и корневой системы путем отбора растений в различных частях полей. Лабораторные исследования отобранных растений проводились в Кубанском ГАУ (кафедра эксплуатации и технического сервиса) и на опытной станции учебно-опытного хозяйства «Кубань».

Объектом исследования являлся технологический процесс дифференцированного внесения удобрений по модели ИИ и его влияние на вегетацию, урожайность и качественные показатели озимой пшеницы.

В исследовании использовались следующие материалы: образцы озимой пшеницы, отобранные в поле в различных фазах вегетации; образцы почвы с полей для агрохимического анализа перед проведением экспримента; данные полевого эксперимента (урожайность, качественные показатели, показатели вегетации); спутниковые данные (спектральные снимки Sentinel-2, рассчитанные вегетационные индексы); сторические данные (данные об урожайности за предыдущие годы, данные о предшественниках, нормах внесения удобрений и др.).

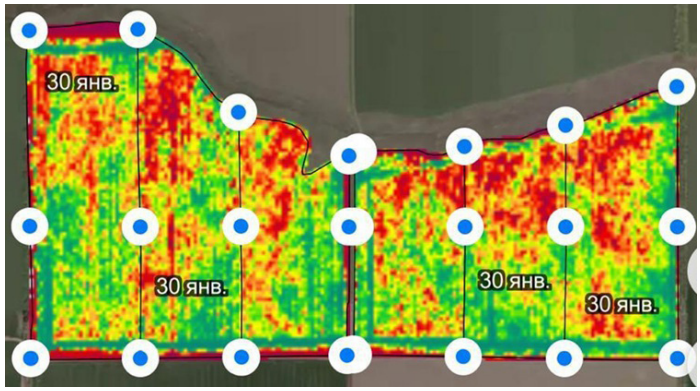
Применялись общие и частные методы полевых исследований. При дифференцированном внесении удобрений использовались разные нормы удобрений по зонам поля в соответствии с картами-заданиями. Исследование отобранных образцов растений выполнялось в специализированной лаборатории (Кубанский ГАУ) для определения качественных показателей (белок, клейковина). Это позволило получить объективные данные о влиянии различных схем внесения удобрений на качество зерна, что является важным экономическим фактором.

Процедура исследований включала в себя: 1) планирование (определение целей, задач, выбор полей и методов, сбор исторической информации); 2) сбор и подготовку данных для ИИ – получение спутниковых снимков, расчет индексов, формирование обучающей выборки (включая попытку синтеза данных), нормализация; 3) разработку и обучение модели – создание и обучение LSTM-модели, постобработка прогнозов (сглаживание, расчет норм, форматирование Shape); 4) полевой эксперимент (разделение полей на зоны, дифференцированное внесение удобрений по ИИ-картам и контрольным схемам, мониторинг вегетации, сбор данных урожайности и качества); 5) анализ результатов и выводы (экономическая оценка, статистическое сравнение схем, оценка эффективности ИИ-модели).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения сравнительных исследований предложенной ООО «ПрофАгро» модели экспериментальных исследований выбраны следующие поля в АО «Рассвет» Усть-Лабинского района Краснодарского края: поле № 221 (83 га); поле № 226 (68 га). Предшественником на обоих полях была кукуруза. Тип почвы – чернозем обыкновенный. Каждое поле было разделено на три варианта (рис. 1): 221_1, 226_1 – в зону низкой продуктивности вносилось больше удобрений; 221_2, 226_2 – в зону низкой продуктивности вносилось меньше удобрений; 221_3, 226_3 – удобрения вносились одной дозой (хозяйственная схема).

Была проведена разметка вариантов полей по геометкам и дальнейший анализ в системах OneSoil и Cropwise.



Р и с. 1. Схема вариантов полей с контрастным отображением вегетации (слева направо): 221_1; 221_2; 221_3; 226_1; 226_2; 226_3

F i g. 1. Scheme of field variants with contrasting vegetation display (from left to right): 221_1; 221_2; 221_3; 226_1; 226_2; 226_3

Источник: рисунки 1, 2, 8 адаптированы из источника[15].
Source: figures 1, 2, and 8 are adapted from the source.

Для модели ИИ взяты за основу прогнозирование урожайности поля через соотношение индексов EVI (улучшенный индекс растительности), NDWI (нормализованный разностный водный индекс), REP (индекс положения красных краев), SR (простой вегетационный индекс), рассчитанные на основании спектральных спутниковых снимков Sentinel-2. Во время обучения бралось среднее значение каждого индекса по изображению, так как известно было только общее число урожайности по полю. Для конфигурации сети за основу была взята LSTM архитектура с большим слоем и другими измененными гиперпараметрами.

В процессе обучения в модель подавались последовательности по четырем усредненным индексам по каждому изображению за девять посевных месяцев, таргет – урожайность. Урожайность нормализуется от 0 до 1. Выход модели – число от 0 до 1, значение продуктивности (урожайности).

[15] ООО «ПрофАгро» [Электронный ресурс]. URL: file:///C:/Users/User/Downloads/kq52zissq9%20(2).pdf (дата обращения: 21.10.2024).

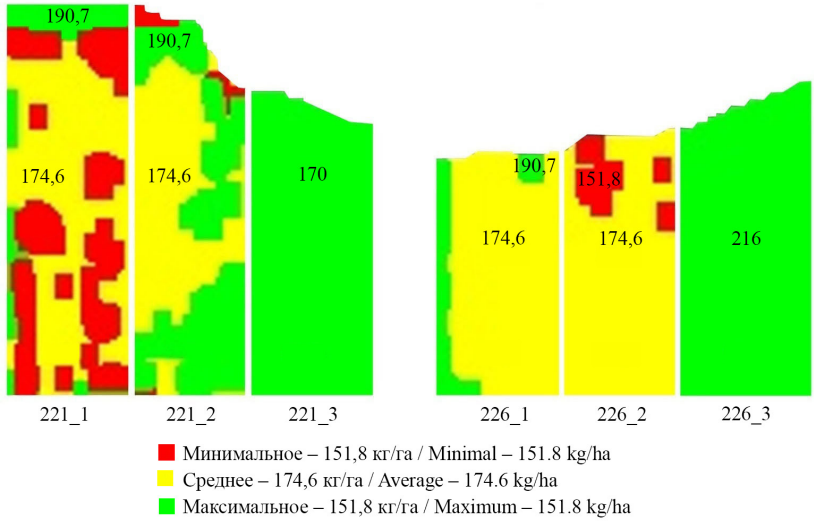
В качестве обучающих данных были взяты 200 полей с имеющейся информацией об урожайности. Для каждого поля были использованы снимки во всех спектрах, и выбраны по одному наилучшему снимку за каждый месяц посевного года (без облаков).

Так как обучающих данных было недостаточно, предпринята попытка синтезирования данных. Урожайность для всего поля разделялась по пикселям согласно значениям NDVI. В модель подавались уже не средние значения, а значения индексов в каждом пикселе, в качестве таргета использовалась урожайность в соответствующем пикеле. Таким образом кратно увеличивались данные, но существенного прироста в качестве модели достигнуто не было.

Для полученных из модели прогнозов продуктивности проведено сглаживание. Необходимость сглаживания карты вызвана техническими ограничениями: разбрасыватель удобрений работает единой нормой на всю ширину захвата (в нашем случае обработка проводилась с шириной захвата 24 м). После сглаживания на карту была добавлена информация о нормах внесения, карта преобразована в карту-задание для техники формата Shape.

Итоговые нормы для первой подкормки аммиачной селитрой рассчитали по данным об урожайности за 2020–2023 гг. путем построения корреляции между культурой предшественником, первой подкормкой и урожайностью. Были выбраны значения с максимальной урожайностью для полей с предшественником «кукуруза». Получены нормы первой подкормки 151,8–174,6–190,7 кг/га для прогнозируемой урожайности 72 ц/га.

В результате анализа данных получена модель на основе ИИ, которая позволила получить карты-задания для первой подкормки аммиачной селитрой (рис. 2).



Р и с. 2. Графическое отображение карт-заданий для дифференцированного внесения удобрений на полях 221 (слева) и 226 (справа) по вариантам с дозами (первая подкормка)

F i g. 2. Graphic representation of task maps for variable rate application of fertilizers in fields 221 (left) and 226 (right) through the variants with doses (first feeding)

Внесение удобрений осуществлялось на участках 226_1, 226_2, 226_3 агрегатом трактор Axion 850 + разбрасыватель Amazone ZG-TS 7501 Profis (рис. 3); на поле 221_1, 221_2 – трактор Fendt 720 + разбрасыватель Amazone ZG-TS 7501; на участке хозяйственной схемы 221_3 – самоходный разбрасыватель Туман-3 (рис. 4).



Р и с. 3. Агрегат Axion 850 + Amazone ZG-TS 7501 Profis
F i g. 3. Unit Axion 850 + Amazone ZG-TS 7501 Profis



Р и с. 4. Разбрасыватель Туман-3
F i g. 4. Spreader Fog-3

Источник: фотографии для рисунков 3–6 сделаны Е. В. Труфляком при второй подкормке в Усть-Лабинском районе 19 марта 2024 г.
Source: the photographs for figures 3–6 were taken by E. V. Truflyak during the second feeding in Ust-Labinsky district on March 19, 2024.

Проводились наземные измерения растений до и после азотных подкормок. Проводился отбор растений с 1 погонного метра (рис. 5), замеры ручным Гринсикером индекса вегетации NDVI на каждом варианте по 20 повторностей (рис. 6).

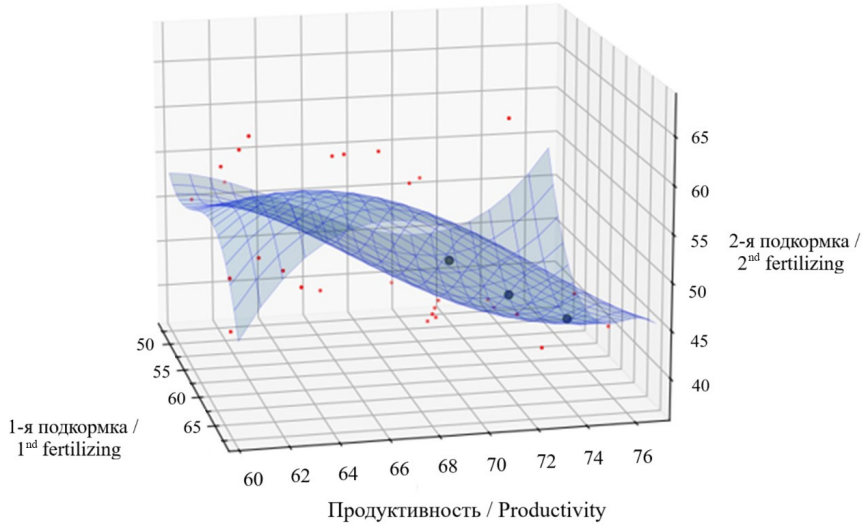


Р и с. 5. Отбор растений
F i g. 5. Plant selection



Р и с. 6. Измерения Гринсикером
F i g. 6. Greensicker measurements

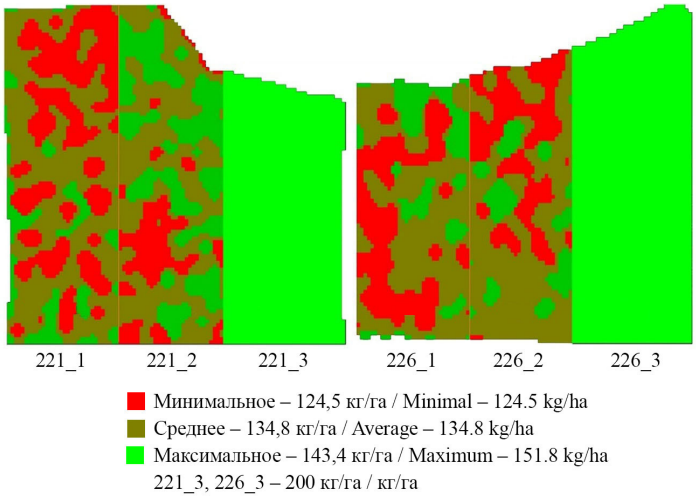
Для определения доз внесения селитры построен график зависимости урожайности от первой и второй подкормки по данным об урожайности за 2020–2023 гг. Была построена «обратная» зависимость второй подкормки от первой урожайности. Аппроксимирован график и получена трехмерная квадратичная плоскость (рис. 7).



Р и с. 7. Трехмерная квадратичная плоскость
F i g. 7. Three-dimensional quadratic plane

Источник: рисунок составлен ООО «ПрофАгро».
Source: diagram was compiled by ProfAgro LLC.

В результате анализа данных за три года получена модель на основе ИИ, которая позволила получить карты-задания для второй подкормки аммиачной селитрой (рис. 8).



Р и с. 8. Графическое отображение карт-заданий для дифференцированного внесения удобрений на полях 221 (слева) и 226 (справа) по вариантам с дозами (вторая подкормка)

F i g. 8. Graphical representation of task maps for variable rate application of fertilizers on fields 221 (left) and 226 (right) through the variants with doses (second top dressing)

Получили значения норм второй подкормки 124,5–134,8–143,4 кг/га для прогнозируемой урожайности 72 ц/га.

Сводные результаты измерений отобранных растений до и после подкормок представлены в таблице 1.

Таблица 1
Table 1

Сводные результаты измерения
Summarized measurement results

Общая масса растений с 1 погонного метра, г / Total weight of plants from 1 linear meter, g						
1	2	3	4	5	6	7
До подкормки / Before feeding	**73,76**	45,65	45,62	50,84	**54,02**	42,88
После первой подкормки / After the first top dressing	**198,87**	166,07	132,24	86,53	106,02	**118,77**
Разница, раз / Difference, times	*↑ 2,7*	*↑ 3,6*	*↑ 2,9*	*↑ 1,7*	*↑ 2*	*↑ 2,8*
После второй подкормки / After the second top dressing	**394,74**	385,35	371,16	218,03	242,07	**250**
Разница, раз / Difference, times	*↑ 2*	*↑ 2,3*	*↑ 2,8*	*↑ 2,5*	*↑ 2,3*	*↑ 2,1*
Масса растения, г / Plant weight, g						
До подкормки / Before feeding	**0,811**	0,692	0,634	0,598	**0,702**	0,604
После первой подкормки / After the first top dressing	**2,486**	1,661	1,812	1,082	**1,683**	1,627
Разница, раз / Difference, times	*↑ 3,1*	*↑ 2,4*	*↑ 2,9*	*↑ 1,8*	*↑ 2,4*	*↑ 2,7*
После второй подкормки / After the second top dressing	5,298	5,033	**5,718**	3,523	3,39	**3,847**
Разница, раз / Difference, times	*↑ 2,1*	*↑ 3*	*↑ 3,2*	*↑ 3,3*	*↑ 2*	*↑ 2,4*
Количество растений на 1 погонном метре, шт. / Number of plants per 1 linear meter, pcs.						
До подкормки / Before feeding	**91**	66	72	**85**	77	71
После первой подкормки / After the first top dressing	80	**100**	73	**80**	63	73
Разница, % / Difference, %	*↓ 12*	*↑ 66*	*↑ 1,4*	*↓ 6*	*↓ 18*	*↑ 3*
После второй подкормки / After the second top dressing	**77**	**77**	65	62	**74**	69
Разница, % / Difference, %	*↓ 4*	*↓ 23*	*↓ 11*	*↓ 23*	*↑ 15*	*↓ 5*
Длина растения, мм / Plant length, mm						
До подкормки / Before feeding	**217,0**	207,0	193,6	172,0	**187,1**	171,4
После первой подкормки / After the first top dressing	233,4	**237,8**	235,4	203,9	**212**	210,2
Разница, % / Difference, %	*↑ 7*	*↑ 13*	*↑ 17*	*↑ 16*	*↑ 12*	*↑ 18*
После второй подкормки / After the second top dressing	**507,6**	501,4	498,3	467,4	**477,0**	468,9
Разница, раз / Difference, times	*↑ 2,2*	*↑ 2,1*	*↑ 2,1*	*↑ 2,3*	*↑ 2,3*	*↑ 2,2*
Количество стеблей на растении, шт. / Number of stems per plant, pcs.						
До подкормки / Before feeding	**2,7**	2,6	2,4	2,3	**2,8**	2,6
После первой подкормки / After the first top dressing	**3,9**	3,2	3,5	3,3	**3,4**	2,8
Разница, % / Difference, %	*↑ 31*	*↑ 19*	*↑ 31*	*↑ 30*	*↑ 18*	*↑ 7*
После второй подкормки / after the second top dressing	**3,1**	2,9	2,9	**2,9**	2,3	2,3
Разница, % / Difference, %	*↓ 21*	*↓ 9*	*↓ 17*	*↓ 12*	*↓ 32*	*↓ 18*

Окончание табл. 1 / End of table 1

1	2	3	4	5	6	7
Количество листьев на растении, шт. / Number of leaves on the plant, pcs.						
До подкормки / Before feeding	5,3	**6,3**	4,8	6,0	**8,1**	6,5
После первой подкормки / After the first top dressing	5,3	**6,9**	5,5	6,3	**8**	6,6
Разница, % / Difference, %	–	*↑ 9*	*↑ 13*	*↑ 5*	–	–
После второй подкормки / After the second top dressing	**5,5**	5,4	5,4	**6,2**	5,1	5
Разница, % / Difference, %	*↑ 4*	*↓ 28*	*↓ 2*	*↓ 2*	*↓ 36*	*↓ 24*
Длина корня, мм / Root length, mm						
До подкормки / Before feeding	**99,6**	88,8	87,8	91,1	90,8	**104,3**
После первой подкормки / After the first top dressing	80,3	**110,6**	90,8	53,5	65,5	**72,2**
Разница, % / Difference, %	*↓ 19*	*↑ 20*	*↑ 3*	*↓ 41*	*↓ 28*	*↓ 31*
После второй подкормки / After the second top dressing	91,1	77,5	**96,1**	**94,5**	87,6	79,2
Разница, % / Difference, %	*↑ 12*	*↓ 30*	*↑ 6*	*↑ 43*	*↑ 25*	*↑ 9*
Ширина корня, мм / Root width, mm						
До подкормки / Before feeding	**3,3**	3,0	2,8	4,2	4,3	**4,7**
После первой подкормки / After the first top dressing	**4,6**	4,3	4,3	4,5	**4,8**	4,4
Разница, % / Difference, %	*↑ 28*	*↑ 30*	*↑ 35*	*↑ 7*	*↑ 10*	*↓ 6*
После второй подкормки / After the second top dressing	5,2	**6,2**	4,4	**5,3**	4	5
Разница, % / Difference, %	*↑ 12*	*↑ 31*	*↑ 2*	*↑ 15*	*↓ 17*	*↑ 12*

Примечание: жирным выделены наибольшие значения; курсивом – относительная разница; 221_1, 226_1 – в зону низкой продуктивности вносилось больше удобрений; 221_2, 226_2 – в зону низкой продуктивности вносилось меньше удобрений; 221_3, 226_3 – удобрения вносились одной дозой (хозяйственная схема).

Note: the largest values are highlighted in bold; the relative difference is in italics; 221_1, 226_1 – more fertilizers were applied to the zone of low productivity; 221_2, 226_2 – less fertilizers were applied to the zone of low productivity; 221_3, 226_3 – fertilizers were applied in one dose (economic scheme).

После второй подкормки по варианту 221_1 наибольшими были 5 показателей размерно-массовых характеристик растений (рис. 9). При этом до подкормок по варианту 221_1 были наилучшими 7 показателей из 8.

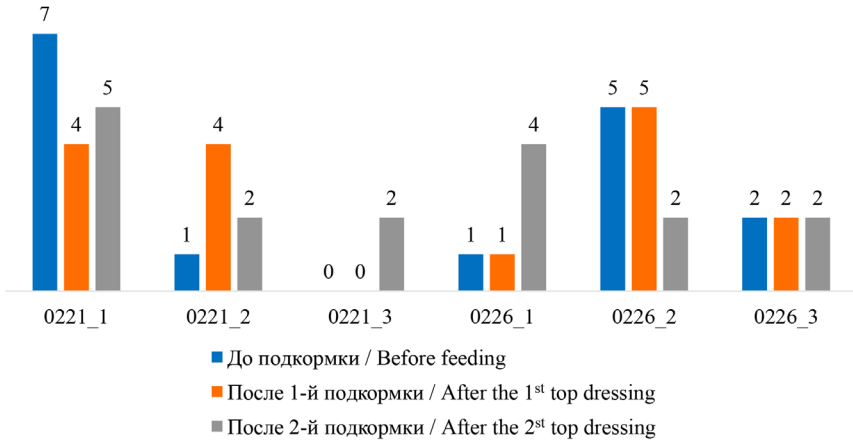
По варианту 221_2 после второй подкормки наибольшими были 2 показателя, вариант 226_1 до второй подкормки показывал наименьшие показатели, после второй подкормки получено 4 наибольших показателя.

Наилучшие показатели до и после первой подкормки показывал вариант 226_2 (5 показателей), после второй эти показатели снизились до 2.

Уборка урожая в поле 221 осуществлялась 22.06.2024 г., в поле 226 – 23.06.2024 г. Уборка проходила с использованием четырех комбайнов Torum 750, Torum 785 и RSM 161. Каждый комбайн был оборудован системой GPS, позволяющей точно определить площадь убранного участка. При выгрузке фиксировалась площадь обработанного участка для дальнейшего расчета урожайности.

Для определения биологической урожайности пшеницы использовалась следующая методика. Сначала по каждому варианту поля были выбраны три

произвольные точки вначале, середине и конце участка. В произвольном месте каждой геометки устанавливалась квадратная рамка площадью 1 м^2 (рис. 10).



Р и с. 9. Сравнение вариантов по количеству наибольших значений размерно-массовых показателей растений

F i g. 9. Comparison of variants by the number of the highest values of size-mass indices of plants

Источник: рисунки 9, 11 составлены авторами статьи.
Source: diagrams 9, 11 are compiled by the authors of the article.



Р и с. 10. Сбор биологической массы в варианте 221_1

F i g. 10. Collection of biological mass in variant 221_1

Источник: фотография сделана Е. В. Труфляком при уборке урожая в Усть-Лабинском районе 22 июня 2024 г.
Source: the photo was taken during harvesting in Ust-Labinsk district on June 22, 2024, by E. V. Truflyak.

Все колосья внутри рамки аккуратно срезались и складывались в мешок, который маркировался номером для идентификации проб. Также собирались все потерянные колоски. Затем мешки с пробами доставлялись в лабораторию опытной станции учебно-опытного хозяйства «Кубань» Кубанского ГАУ для дальнейшего анализа.

В лаборатории колосья обмолачивались молотилкой Wintersteiger LD 35, зерно взвешивалось (весы CAS ED–H), упаковывалось в пакеты для дальнейшего анализа в лаборатории. Для определения показателей зерна, таких как влажность, натура, протеин, клейковина и крахмал, использовался анализатор Perten Instruments IM 9500.

В таблице 2 представлены обобщенные качественные показатели зерна.

Таблица 2
Table 2

Результаты определения качественных показателей зерна по вариантам
Results of determination of grain quality indicators by variants

Качественные показатели зерна / Quality indicators of grain		Вариант / Variant					
		221_1	221_2	221_3	226_1	226_2	226_3
Протеин, % / Protein, %	Значение / Significance	11,867	12,333	13,367	12,367	12,700	12,600
	Разница с хозяйственной схемой, % / Difference with the farm scheme, %	↓ 1,500	↓ 1,030	–	↓ 0,230	↑ 0,100	–
Клейковина, % / Gluten, %	Значение / Significance	23,367	24,400	26,667	24,467	25,300	25,000
	Разница с хозяйственной схемой, % / Difference with the farm scheme, %	↓ 3,300	↓ 2,270	–	↓ 0,530	↑ 0,300	–
Натура, г/л / Natura, g/l	Значение / Significance	813,333	808,333	805,667	822,333	818,667	809,333
	Разница с хозяйственной схемой, % / Difference with the farm scheme, %	↑ 0,950	↑ 0,330	–	↑ 1,600	↑ 1,150	–
Класс / Class		4–3	3	3	3	3	3

Проанализировав результаты по качеству зерна, можно сделать вывод, что практически все варианты относятся к 3-му классу. Увеличение натуры прямо пропорционально снижению содержания протеина и клейковины по обоим полям вариантов ИИ. Содержание протеина по всем вариантам ИИ (кроме варианта 226_2) ниже на 0,23–1,5 %. Содержание клейковины по всем вариантам ИИ (кроме варианта 226_2) ниже на 0,53–3,3 %. Натура по вариантам ИИ выше на 0,33–1,6 %. Содержание клейковины по всем вариантам ИИ (кроме варианта 226_2) ниже на 0,53–3,3 %. Итоговая урожайность по вариантам представлена в таблице 3.

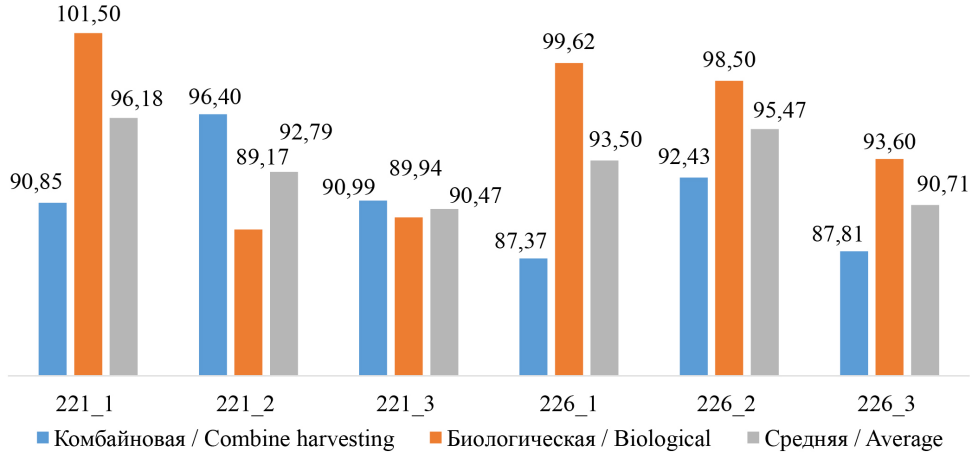
Графическое изображение сравнения урожайностей для наглядности приведено на рисунке 11.

Таблица 3
Table 3

Итоговые результаты с учетом комбайновой и биологической урожайности по вариантам
Final results taking into account biological yield and yield when combine harvesting by variants

Вариант / Variant	Урожайность, ц/га / Yield, c/ha				
	Комбайновая / Combine harvesting	Биологическая / Biological	Средняя / Average	Разница с хозяйственной схемой / Difference with the farm scheme	
				ц/га / c/ha	%
221_1 (низкая продуктивность – больше удобрений) / 221_1 (low productivity – more fertilizer)	90,85	101,50	**96,18**	↑ 5,71	↑ 6,31
221_2 (низкая продуктивность – меньше удобрений) / 221_2 (low productivity – less fertilizer)	96,40	89,17	**92,79**	↑ 2,32	↑ 2,56
221_3 (хозяйственная схема) / 221_3 (farm scheme)	90,99	89,94	**90,47**	–	–
226_1 (низкая продуктивность – больше удобрений) / 226_1 (low productivity – more fertilizer)	87,37	99,62	**93,50**	↑ 2,79	↑ 3,08
226_2 (низкая продуктивность – меньше удобрений) / 226_2 (low productivity – less fertilizer)	92,43	98,50	**95,47**	↑ 4,76	↑ 5,25
226_3 (хозяйственная схема) / 226_3 (farm scheme)	87,81	93,60	**90,71**	–	–

Примечание: жирным выделены средние значения урожайности.
Note: the average yields are highlighted in bold.



Р и с. 11. Урожайность вариантов, ц/га
F i g. 11. Yield of variants, c/ha

В результате усредненная урожайность по полю 221 выше на 6,31 % по варианту «низкая продуктивность – больше удобрений» и на 2,56 % по варианту «низкая продуктивность – меньше удобрений». Усредненная урожайность по полю 226 выше на 5,25 % по варианту «низкая продуктивность – меньше удобрений» и на 3,08 % по варианту «низкая продуктивность – больше удобрений». Изменчивость признака в среднем по признаку «биологическая урожайность» незначительная, так как она менее 10 %. Относительная ошибка менее 7–8 %, что удовлетворительно для полевых экспериментов.

Наилучшие данные по усредненной урожайности показали варианты 221_1 и 226_2. Эти варианты имели оптимальные показатели размерно-массовых характеристик растений до проведения эксперимента (7 и 5 показателей соответственно). Для достоверности полученной урожайности по вариантам 221_1 и 226_2 и понятия насколько сработала в данных случаях модель ИИ при подкормках требуются трехлетние исследования в данной природно-климатической зоне.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эксперимент проводился для оценки экономической эффективности различных схем внесения удобрений. Сравнение делалось между контрольной схемой, отечественной и европейской технологиями. В ходе эксперимента были измерены урожайность, затраты на производство, себестоимость продукции, выручка и прибыль с одного гектара.

Представлен расчет экономической эффективности по данным АО «Рассвет» с учетом комбайновой урожайности (табл. 4).

Таблица 4
Table 4

Экономическая эффективность использования модели искусственного интеллекта полей 221 и 226
Cost-effectiveness of using the AI model on fields 221 and 226

Показатель / Indicator	Схема / Scheme			Отклонение схемы 1 от контроля / Deviation of scheme 1 from control	Отклонение схемы 2 от контроля / Deviation of scheme 2 from control
	Контроль / Control	1. Российская / 1. Russian	2. Европейская / 2. European		
1	2	3	4	5	6
Производство / Production					
Уборочная площадь, га / Harvest area, ha	46	49	42	–	–
Объем производства (физический вес), т / Production volume (physical weight), t	412,50	437,30	395,10	–	–
Объем производства (зачетный вес), т / Production volume (net weight), t	379,50	402,30	363,50	–	–
Урожайность (физический вес), ц/га / Yield (physical weight), c/ha	89,40	89,50	94,50	0,20	5,20
Урожайность (зачетный вес), ц/га / Yield (net weight), c/ha	82,20	82,40	87,00	0,20	4,80

Окончание табл. 4 / End of table 4

1	2	3	4	5	6
Реализация / Realization					
Объем реализованной продукции, т / Volume of products sold, t	379	402	364	22,90	–16,00
Средняя цена реализации 1 т (без НДС), руб. / Average selling price per ton (excluding VAT), rub.	13 463	13 463	13 463	0,00	0,00
Себестоимость 1 т реализованной продукции, руб. / Cost of 1 ton of sales, rub.	6 536	6 253	5 817	–283,0	–719,0
Выручка от реализации (без НДС), млн руб. / Sales revenue (net of VAT), million rub.	5,10	5,40	4,90	0,30	–0,20
Себестоимость реализованной продукции, млн руб. / Cost of sales, million rub.	2,50	2,50	2,10	0,00	–0,40
Валовая прибыль, млн руб. / Gross profit, million rub.	2,63	2,90	2,78	0,27	0,15
Рентабельность (убыточность), % / Profitability (unprofitability), %	51,50	53,60	56,80	2,10	5,30
Выручка с 1 га, руб. / Revenue per 1 ha, rub.	110 678	110 905	117 079	228	6 401
Условная прибыль с 1 га уборочной площади, руб. / Conditional profit per 1 ha of harvested area, rub.	56 947	59 395	66 493	2 448	9 546
Затраты на производство / Production costs					
Удобрения минеральные, руб./га / Mineral fertilizers, rub./ha	16 545	14 732	13 977	–1 813	–2 567

Расчет экономической эффективности выполнялся АО «Рассвет» с учетом полученной комбайновой урожайности для полей 221 и 226 вместе.

При использовании европейской технологии на двух экспериментальных полях производственные затраты снизились на 400 тыс. руб. по сравнению с контрольной схемой, а затраты на удобрения уменьшились на 2 567 руб./га. Выручка с 1 га увеличилась на 6 401 руб., условная прибыль на 9 546 руб. Валовая прибыль по европейской схеме также увеличилась на 150 тыс. руб., а рентабельность на 5,3 % по сравнению с контрольной схемой.

Результаты предложенных методов валидации и созданной модели дифференцированного внесения азотных удобрений использовались в работе нейросети. Эффективность работы нейросети оценена в реальных условиях сельского хозяйства по урожайности путем создания шкалы работы по отношению с существующими методами внесения удобрений (повышение урожайности от 2,56 до 6,31 %).

Предложена рабочая модель ИИ для точного земледелия, которая позволяет экономить удобрения при одновременном сохранении или увеличении урожайности; повышать экономическую эффективность за счет сокращения затрат и роста прибыли; снижать негативное воздействие на окружающую среду путем оптимизации использования агрохимикатов; предоставлять агрономам инструмент для обоснованного управления питанием растений.

Для достоверности полученной урожайности и понятия насколько сработала в данных случаях модель ИИ по отношению к урожайности при подкормках

с агрономической точки зрения требуются трехлетние исследования в данной природно-климатической зоне.

В 2024–2025 гг. запущены производственные испытания дифференцированного внесения удобрений (основное внесение и две подкормки) под озимую пшеницу по модели ИИ.

Для проведения производственных испытаний первоначально выбрано 25 опытных и 25 контрольных полей АО «Рассвет». Общая площадь составляет 4 250 га, опытных полей – 2 322 га, контрольных – 1 928 га.

Дальнейшее развитие включает улучшение и расширение баз данных для обучения модели, адаптацию технологии для других культур и регионов, создание комплексных систем для управления всеми агротехническими операциями, разработку ПО для широкого внедрения ИИ-решений в сельском хозяйстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Личман Г.И., Батурин В.А., Марченко А.Н. Определение доз при дифференцированном внесении комплексных удобрений. *Сельскохозяйственные машины и технологии.* 2012;(3):35–37. https://elibrary.ru/oxupvv
2. Беляев В.И., Садов В.В., Смышляев А.А., Кошелева Е.Д. Оценка эффективности точного земледелия при возделывании яровой пшеницы в Алтайском крае в 2022 и 2023 гг. *Дальневосточный аграрный вестник.* 2024;18(2):5–16. https://doi.org/10.22450/1999-6837-2024-18-2-5-16
3. Абрамов Н.В., Шерстобитов С.В. Формирование зерна яровой пшеницы высокого качества при дифференцированном внесении азотных удобрений. *Земледелие.* 2024;(3):33–39. https://doi.org/10.24412/0044-3913-2024-3-33-39
4. Альберт М.А., Галеев Р.Р., Ковалев Е.А. Совершенствование технологии дифференцированного внесения удобрений в лесостепи Новосибирского Приобья. *Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет)*. 2022;(2):4–10. https://doi.org/10.31677/2072-6724-2022-63-2-4-10
5. Якушев В.П., Якушев В.В., Блохина С.Ю., Блохин Ю.И., Петрушин А.Ф., Матвеенко Д.А. Перспективы использования гиперспектральной информации в задачах управления азотным режимом посевов зерновых культур. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2024;21(3):188–203. https://doi.org/10.21046/2070-7401-2024-21-3-188-203
6. Ботвич И.Ю., Емельянов Д.В., Шевырногов А.П. Дифференцированное внесение удобрений на полях ОПХ «Курагинское» ФИЦ КНЦ СО РАН. Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов (SDM-2023) : сб. тр. Всеросс. конф. с междунар. участием (22–25 августа 2023 г., г. Бердск). 2023:221–225. https://doi.org/10.25743/sdm.2023.39.68.037
7. Truflyak E.V., Kurchenko N.Yu., Kuryan V.E., Mones D. Comparative Tests of Differentiated Fertilizer Application for Wheat Using Task Cards and Nitrogen Scanner. In: E3S Web of Conferences. 2021;285:01016. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128501016
8. Труфляк Е.В., Скубиев С. И., Цыбулевский В. В., Малашихин Н. В. Дистанционный мониторинг посевов риса и алгоритм выявления неоднородностей. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2019;16(3):110–124. https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-3-110-124
9. Truflyak E.V., Dadou Mones M.Y., Truflyak I.S. Comparative Experiment on the Use of Unmanned and Ground-Based Technologie of Fertilizer and Crop Protection Products on Winter Barley. In: E3S Web of Conferences. 2023;398:01024. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339801024

10. Sajindra H., Abekoon T., Jayakody J.A.D.C.A., Rathnayake U. A Novel Deep Learning Model to Predict the Soil Nutrient Levels (N, P, and K) in Cabbage Cultivation. *Smart Agricultural Technology.* 2024;7:100395. https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100395
11. Singh S., Singh R., Singh K., Katoch K., Zaeen A.A., Birhan D.A., et al. Smart Fertilizer Technologies: An Environmental Impact Assessment for Sustainable Agriculture. *Smart Agricultural Technology.* 2024;8:100504. https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100504
12. Khose S.B., Mailapalli D.R. Spatial Mapping of Soil Moisture Content Using Very-High Resolution UAV-Based Multispectral Image Analytics. *Smart Agricultural Technology.* 2024;8:100467. https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100467
13. Zhang C., Yi Y., Wang L., Chen S., Li P., Zhang S., et al. Efficient Physics-Informed Transfer Learning to Quantify Biochemical Traits of Winter Wheat from UAV Multispectral Imagery. *Smart Agricultural Technology.* 2024;9:100581. https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100581
14. Papadopoulos G., Mavroeidis A., Roussis I., Kakabouki I., Stavropoulos P., Bilalis D. Evaluation of Tillage & Fertilization in Carthamus Tinctorius L. Using Remote Sensing. *Smart Agricultural Technology.* 2023;4:100158. https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100158
15. Jiang X., Sun S., Adamchuk V., Weisman G., Ramsay P., Rincon A.R. Spinach Yield Mapping Using Multispectral UAV Imagery. *Smart Agricultural Technology.* 2024;7:100389. https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100389
16. Cavalaris C., Karamoutis C., Markinos A. Efficacy of Cotton Harvest Aids Applications with Unmanned Aerial Vehicles (UAV) and Ground-Based Field Sprayers – A Case Study Comparison. *Smart Agricultural Technology.* 2024;2:100047. https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100047
17. Lago P.D., Vavlas N., Kooistra L., De Deyn G.B. Estimation of Nitrogen Uptake, Biomass, and Nitrogen Concentration, in Cover Crop Monocultures and Mixtures from Optical UAV Images. *Smart Agricultural Technology.* 2024;9:100608. https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100608
18. Труфляк Е.В., Курченко Н.Ю. Оценка готовности регионов к внедрению цифровых технологий в сельское хозяйство. *Вестник Самарского государственного экономического университета.* 2019;(10):22–26. https://elibrary.ru/zoatgg

Об авторах:

Труфляк Евгений Владимирович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой эксплуатации и технического сервиса Кубанского государственного аграрного университета (350044, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Калинина, д. 13), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4914-0309, Researcher ID: D-1301-2018, Scopus ID: 57188716454, trufliak@mail.ru

Рагозин Леонид Викторович, вице-президент группы компаний «Прогресс Агро» (352330, Российская Федерация, г. Усть-Лабинск, ул. Мира, д. 77), ORCID: https://orcid.org/0009-0005-7547-7895, PopovaEP@aorassvet.com

Вклад авторов:

Е. В. Труфляк – контроль, лидерство и наставничество в процессе планирования и проведения исследования; осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор данных; создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования и полученных данных.

Л. В. Рагозин – административное управление планированием и проведением исследования.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила в редакцию 07.02.2025; поступила после рецензирования 29.04.2025; принята к публикации 15.05.2025

REFERENCES

1. Lichman G.I., Baturin V.A., Marchenko A.N. [Determination of Doses at Differentiated Application of Complex Fertilizers]. *Agricultural Machinery and Technologies.* 2012;(3):35–37. (In Russ.) https://elibrary.ru/oxupvv
2. Belyaev V.I., Sadov V.V., Smyshlyaev A.A., Kosheleva E.D. Evaluation of Effectiveness of Precision Farming in Spring wheat Cultivation in Altai Krai in 2022 and 2023. *Dal'nevostochnyj Agrarnyj Vestnik.* 2024;18(2):5–16. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.22450/1999-6837-2024-18-2-5-16
3. Abramov N.V., Sherstobitov S.V. Formation of High-Quality Spring Wheat Grain with Differentiated Application of Nitrogen Fertilizers. *Zemledeliye.* 2024;(3):33–39. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.24412/0044-3913-2024-3-33-39
4. Albert M.A., Galeev R.R., Kovalev E.A. Improvement of Differentiated Fertilizer Application Technology in the Forest-Steppe of Novosibirsk Priobye. *Bulletin of NSAU (Novosibirsk State Agrarian University).* 2022;(2):4–10. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.31677/2072-6724-2022-63-2-4-10
5. Yakushev V.P., Yakushev V.V., Blokhina S.Yu., Blokhin Yu.I., Petrushin A.F., Matveenko D.A. Benefits of Hyperspectral Information for Nitrogen Management in Grain Crop Production. *Sovremennye Problemy Distantsionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa.* 2024;21(3):188–203. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.21046/2070-7401-2024-21-3-188-203
6. Botvich I.Yu., Emelyanov D.V., Shevyrnogov A.P. Variable Rate Fertilization on the Fields of the EPF Kuraginskoe FRC KSC SB RAS. In: Spatial Data Processing in the Monitoring of Natural and Anthropogenic Processes (SDM-2023) : Proceedings of the All-Russian Conference with International Participation (2023 August 22–25, Berdsk). 2023:221–225. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.25743/sdm.2023.39.68.037
7. Truflyak E.V., Kurchenko N.Yu., Kuryan V.E., Mones D. Comparative Tests of Differentiated Fertilizer Application for Wheat Using Task Cards and Nitrogen Scanner. In: E3S Web of Conferences. 2021;285:01016. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128501016
8. Truflyak E.V., Skubiev S.I., Tsybulevsky V. V., Malashikhin N. V. Rice Crops Remote Monitoring and Heterogeneities Detection Algorithm. *Sovremennye Problemy Distantsionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa.* 2019;16(3):110–124. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-3-110-124
9. Truflyak E.V., Dadou Mones M.Y., Truflyak I.S. Comparative Experiment on the Use of Unmanned and Ground-Based Technologie of Fertilizer and Crop Protection Products on Winter Barley. In: E3S Web of Conferences. 2023;398:01024. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339801024
10. Sajindra H., Abekoon T., Jayakody J.A.D.C.A., Rathnayake U. A Novel Deep Learning Model to Predict the Soil Nutrient Levels (N, P, and K) in Cabbage Cultivation. *Smart Agricultural Technology.* 2024;7:100395. https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100395
11. Singh S., Singh R., Singh K., Katoch K., Zaeen A.A., Birhan D.A., et al. Smart Fertilizer Technologies: An Environmental Impact Assessment for Sustainable Agriculture. *Smart Agricultural Technology.* 2024;8:100504. https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100504
12. Khose S.B., Mailapalli D.R. Spatial Mapping of Soil Moisture Content Using Very-High Resolution UAV-Based Multispectral Image Analytics. *Smart Agricultural Technology.* 2024;8:100467. https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100467
13. Zhang C., Yi Y., Wang L., Chen S., Li P., Zhang S., et al. Efficient Physics-Informed Transfer Learning to Quantify Biochemical Traits of Winter Wheat from UAV Multispectral Imagery. *Smart Agricultural Technology.* 2024;9:100581. https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100581
14. Papadopoulos G., Mavroeidis A., Roussis I., Kakabouki I., Stavropoulos P., Bilalis D. Evaluation of Tillage & Fertilization in Carthamus Tinctorius L. Using Remote Sensing. *Smart Agricultural Technology.* 2023;4:100158. https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100158

15. Jiang X., Sun S., Adamchuk V., Weisman G., Ramsay P., Rincon A.R. Spinach Yield Mapping Using Multispectral UAV Imagery. *Smart Agricultural Technology.* 2024;7:100389. https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100389
16. Cavalaris C., Karamoutis C., Markinos A. Efficacy of Cotton Harvest Aids Applications with Unmanned Aerial Vehicles (UAV) and Ground-Based Field Sprayers – A Case Study Comparison. *Smart Agricultural Technology.* 2024;2:100047. https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100047
17. Lago P.D., Vavlas N., Kooistra L., De Deyn G.B. Estimation of Nitrogen Uptake, Biomass, and Nitrogen Concentration, in Cover Crop Monocultures and Mixtures from Optical UAV Images. *Smart Agricultural Technology.* 2024;9:100608. https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100608
18. Truflyak E.V., Kurchenko N.Yu. Assessment of Regions Readiness to Implement Digital Technologies in Agriculture. *Vestnik of Samara State University of Economics.* 2019;(10):22–26. https://elibrary.ru/zoatgg

About the authors:

Evgeny V. Truflyak, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Operation and Technical Service, Kuban State Agrarian University (13 Kalinina St., Krasnodar 350044, Russian Federation), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4914-0309, Researcher ID: D-1301-2018, Scopus ID: 57188716454, trufliak@mail.ru

Leonid V. Ragozin, Vice-President of Group of Companies "Progress Agro" (77 Mira St., Ust-Labinsk 352330, Russian Federation), ORCID: https://orcid.org/0009-0005-7547-7895, PopovaEP@aorassvet.com

Contribution of the authors:

E. V. Truflyak – oversight and leadership responsibility for the study activity planning and conducting, including mentorship external to the core team; conducting the study, specifically performing the experiments, or collecting data; preparing and presenting the manuscript, specifically visualization/data presentation.

L. V. Ragozin – management and coordination responsibility for the study activity planning and conducting.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 07.02.2025; revised 29.04.2025; accepted 15.05.2025

https://vestnik.mrsu.ru ISSN 2658-4123, eISSN 2658-6525

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ / TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT

https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202503.513-528
EDN: https://elibrary.ru/bjkqiv
УДК 631.312:631.58

Оригинальная статья / Original article

Эксплуатационно-технологические показатели агрегатов с плугами ПНЛ-8-40 и ПБС-8М для обработки почвы в засушливом земледелии

С. В. Старцев✉, **А. В. Павлов**, **Е. С. Нестеров**
Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н. И. Вавилова, г. Саратов, Российская Федерация
✉ *kingofscience@yandex.ru*

Аннотация

Введение. Главным направлением развития отечественной экономики становится создание прорывных технологий и продуктов, способных конкурировать на мировом рынке. Производство продуктов растениеводства невозможно без использования самой энергозатратной технологии – основной отвальной обработки почвы, – влияющей на получение высокого урожая в регионах с малым количеством выпадающих атмосферных осадков.

Цель исследования. Определение эксплуатационно-технологических показателей плуга ПНЛ-8-40 и разработанного ПБС-8М для снижения энергозатрат и улучшения агрофизических свойств обработанной почвы.

Материалы и методы. Определение эксплуатационно-технологических показателей процесса обработки почвы серийным плугом ПНЛ-8-40 и разработанным плугом ПБС-8М осуществлялось с применением стандартных методов исследований. Согласно стандарту организации ассоциации испытателей сельскохозяйственной техники СТО АИСТ 4.1-2010 определялись функциональные показатели плугов: рабочая скорость; рабочая ширина захвата; производительность за один час основного времени; погектарный расход топлива. Согласно СТО АИСТ 001-2010 выполнялась агротехническая оценка работы плугов по показателям качества: глубине вспашки; гребнистости поверхности обработанной почвы; степени и глубине заделки стерни в пахотный слой.

Результаты исследования. Установлена целесообразность использования широкозахватного плуга ПБС-8М в засушливых условиях левобережной зоны Поволжья. Теоретически рассчитаны и экспериментально проверены эксплуатационные показатели пахотных агрегатов. Восьмикорпусный плуг ПБС-8М при скорости 2,53 м/с и глубине вспашки 23 см производит за час работы больше на 30–33 %, чем восьмикорпусный плуг ПНЛ-8-40, при более низком (на 22 %) расходе топлива. По агротехнической оценке технологий сравниваемые плуги отличаются степенью заделки растительных и пожнивных остатков по глубине пахотного слоя почвы. Показатели плотности и водопроницаемости почвы практически равнозначны.

© *Старцев С. В., Павлов А. В., Нестеров Е. С., 2025*

Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Обсуждение и заключение. В результате использования разработанного лемешно-отвального плуга ПБС-8М на обработке тяжелосуглинистой почвы снижаются энергозатраты, улучшаются агрофизические свойства почвы. Пахотный агрегат К-701+ПБС-8М, двигаясь в загоне с рабочей скоростью 2,53 м/с, обеспечивает выполнение работ за час основного времени с производительностью 3,9 га/ч. При использовании агрегата К-701+ПНЛ-8-40 в этом же режиме движения производительность составляет 2,6 га/ч. На каждом гектаре топливо экономится до 3,8 кг при работе К-701+ПБС-8М, в сравнении с К-701+ПНЛ-8-40. Из исследований качества выполненной работы по обработке почвы агротехническая оценка показала, что у обоих плугов по всей ширине захвата равномерная глубина – 23,0...23,4 см. Также у каждого орудия отклонение рабочей ширины захвата от конструктивной получено на уровне 4,0 %. Показатель гребнистости поверхности поля 6,9...8,2 см находился в пределах требований агротехники, предъявляемых к технологии отвальной обработки почвы. Различались технологические показатели плугов только по степени заделки растительных и пожнивных остатков проса в почву. После прохода плуга ПБС-8М стерня распределена слоем 5...12 см на глубине 8...15 см, после прохода плуга ПНЛ-8-40 стерня находилась ближе ко дну борозды от 12 до 22 см. Показатели плотности и водопроницаемости почвы, измеренные после культивации пара и перед посевом озимой пшеницы, практически равны у исследуемых плугов, что и отразилось на полученной урожайности культуры – 23,5...24,0 ц/га.

Ключевые слова: разработанный плуг ПБС-8М, серийный плуг ПНЛ-8-40, производительность пахотного агрегата, почва, глубина обработки почвы, заделка стерни, погектарный расход топлива, плотность и водопроницаемость почвы

Финансирование: работа выполнена в рамках НИР по госконтракту № 20-гк от 29.11.2013 г. «Проведение исследований по совершенствованию ресурсосберегающих почвообрабатывающих орудий для основной обработки почвы, агрегатируемых с тракторами мощностью 370–450 л.с. в условиях Саратовской области».

Благодарности: авторы выражают признательность анонимным рецензентам, объективные замечания которых способствовали повышению качества статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Старцев С.В., Павлов А.В., Нестеров Е.С. Эксплуатационно-технологические показатели агрегатов с плугами ПЛН-8-40 и ПБС-8М для обработки почвы в засушливом земледелии. *Инженерные технологии и системы.* 2025;35(3):513–528. https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202503.513-528

Operational and Technological Indicators of the Aggregates with the Plows PNL-8-40 and PBS-8M for Processing Soils in Arid Regions

S. V. Startsev✉, **A. V. Pavlov, E. S. Nesterov**
Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N. I. Vavilov, Saratov, Russian Federation
✉ *kingofscience@yandex.ru*

Abstract

Introduction. The main direction of economic development is creating innovative technologies and products, which can be competitive in the global market. The production of crop products is impossible without using the most energy-intensive technology of moldboard plowing, which has a strong effect on yielding ability in arid regions.

Aim of the Study. The study is aimed at determining the operational and technological indicators of the production plow PNL-8-40 and the newly designed plow PBS-8M to reduce energy consumption and improve the agrophysical properties of the tilled soil.
Materials and Methods. The operational and technological indicators of tilling soil process with the production plow PNL-8-40 and the newly designed plow PBS-8M were determined using standard research methods. According to the standard used by the Association of agricultural machinery test-engineers (СТО АИСТ 4.1-2010), there were defined the functional parameters of the plows: working speed, effective operating width, productivity per hour of main time, and per-hectare fuel consumption. In accordance with СТО АИСТ 001-2010, there was made the agronomic assessment of plowing quality. There we assessed the plowing depth, ridgeness of treated soil surface, degree and depth of plowing in stubble.
Results. As a result of the study, there has been assessed the expediency of using the wide-coverage plow PBS-8M in the arid conditions of the left-bank area of the Volga region. There have been theoretically calculated and experimentally tested the operational indicators of plowing units. The productivity of the eight-furrow plow PBL-8M at a speed of 2.53 m/s and a plowing depth of 23 cm per hour is 30–33% more than the productivity of the eight-body plow PBL-8-40 with a less (by 22%) fuel consumption. According to the agrotechnical evaluation of technologies, the compared plows differ in the degree of trash embedding plant and crop residues along the depth of the plowing layer. The indicators of the soil density and water permeability parameters are almost equal.
Discussion and Conclusions. As a result of using the new designed plow PBS-8M for cultivating heavy loamy soil, energy consumption is reduced while the agro-physical properties of the soil are improved. The plowing unit K-701+PBS-8M, moving at a working speed of 2.53 m/s, completes the work in space of an hour of basic operation time with a productivity of 3.9 ha/h. When using the unit K-701+PNL-8-40 in this operation mode, the productivity is 2.6 ha/h. When using the unit K-701+PBS-8M, fuel consumption is reduced to 3.8 kg per a hectare compared to the use of the unit K-701+PNL-8-40. The studies of the quality of the soil tillage showed that the soil tillage with both plows is of even depth of 23.0–23.4 cm across the full working width. The deviation of the working width from the designed width was 4.0% for each plow. The field surface ridge index was 6.9–8.2 cm. The technological parameters of the plows differed only in the degree of embedding millet plant and crop residues into the soil. After passing the plow PBS-8M, the stubble was distributed in a layer of 5–12 cm at a depth of 8–15 cm, after passing the plow PNL-8-40, the stubble was closer to the bottom of the furrow from 12 to 22 cm. The indicators of soil density and water permeability determined, after steam cultivation and before sowing winter wheat, were almost equal the studied plows that affected the resulting crop yield of 23.5–24.0 c/ha.

Keywords: the new designed plow PBS-8M, the production plow PNL-8-40, plow productivity, soil, soil tillage depth, in stubble, per-hectare fuel consumption, soil density, water permeability

Funding: The work was carried out as part of research under state contract No. 20-gc dated 11.29.2013 “Conducting research on improving resource-saving tillage tools for basic tillage, aggregated with tractors with a capacity of 370–450 hp in the Saratov region”.

Acknowledgments: The authors are grateful to the anonymous reviewers whose objective comments contributed to the quality of the article.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

For citation: Startsev S.V., Pavlov A.V., Nesterov E.S. Operational and Technological Indicators of the Aggregates with the Plows PNL-8-40 and PBS-8M for Processing Soils in Arid Regions. *Engineering Technologies and Systems.* 2025;35(3):513–528. https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202503.513-528

ВВЕДЕНИЕ

Согласно Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации[1], утвержденной Указом Президента Российской Федерации[2], главным направлением развития экономики становится создание прорывных технологий и продуктов, способных конкурировать на мировом рынке. Переуплотнение почв ходовыми системами энергонасыщенных тракторов и рабочими органами тяжелой крупногабаритной сельскохозяйственной техники привело к деградации их агрофизического состояния. Снижается содержание органического вещества, разрушается структура почвы и, как следствие, утрачивается ее плодородие. Чрезмерное уплотнение пахотного слоя может привести к опустыниванию земель сельскохозяйственного назначения, особенно это актуально в регионах, относящихся к зоне рискованного земледелия.

Производство продуктов растениеводства невозможно без выполнения операции основной обработки почвы, влияющей на получение высокого урожая в регионах с малым количеством выпадающих атмосферных осадков. Обработка почвы при производстве сельскохозяйственной продукции является еще и самой энергозатратной и дорогостоящей. Только в левобережной зоне Саратовской области в структуре почвенного покрова на пашне преобладают 87 % почвы глинистого и тяжелосуглинистого состава. Юго-восточная часть области в летний период подвержена частым засухам и суховеям, количество осадков не превышает 250 мм в год[3]. Земельный фонд отличается низким плодородием со значительными площадями сильно засоленной почвы, что повлияло на ее распаханность (только 65 %)[4]. По данным типовых технологических карт[5] на обработку одного гектара плугом общего назначения ПНЛ-8-40 затрачивается от 20,5 до 24,9 кг дизельного топлива. Разработка новой почвообрабатывающей техники для технологии отвальной вспашки, позволяющая экономить затраты топлива, повысить производительность труда на пахотных работах при меньших количествах проходов тяжелой техники по полю и, следовательно, снизить себестоимость возделываемой растениеводческой продукции является важной хозяйственной проблемой.

Таким образом, целью исследования стало повышение производительности и снижение энергозатрат пахотных агрегатов путем улучшения эксплуатационно-технологических показателей разработанного плуга ПБС-8М относительно серийного плуга ПНЛ-8-40.

Задачи исследования: 1) установить возможность увеличения производительности пахотных агрегатов при основной отвальной обработке тяжелосуглинистой

[1] О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации [Электронный ресурс] : Указ Президента Российской Федерации от 28 февраля 2024 г. № 145. URL: https://docs.cntd.ru/document/1305071057 (дата обращения: 21.10.2024).

[2] О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года [Электронный ресурс] : Указ Президента Российской Федерации от 7 мая 2024 г. № 309. URL: http://www.kremlin.ru/acts/bank/50542 (дата обращения: 21.10.2024).

[3] Агроклиматический справочник по Саратовской области. Л. : Гидрометеоиздат, 1958. 227 с.

[4] Посевные площади сельскохозяйственных культур по Саратовской области [Электронный ресурс]. URL: https://64.rosstat.gov.ru/folder/165734 (дата обращения: 21.10.2024).

[5] Натуральные нормативы затрат труда и материально-технических средств. Типовые технологические карты по возделыванию сельскохозяйственных культур и содержанию скота. Саратов.1997. 156 с.

почвы; 2) определить в полевых условиях снижение погектарного расхода топлива у разработанного плуга, в сравнении с серийным плугом; 3) оценить качественные показатели работы обоих плугов на обработке почвы по стерневому фону поля.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Технология отвальной обработки почвы является основной операцией при возделывании сельскохозяйственных культур во всех регионах Российской Федерации. На нее затрачивается более 40 % всех энергетических ресурсов в объеме производства растениеводческой продукции[6] [1]. Согласно исследованиям [2; 3] одним из критериев энергоэффективности является наименьшее тяговое сопротивление корпуса плуга общего назначения. Технологический процесс вспашки такими корпусами не претерпел особых изменений от создания плуга и по настоящее время[7] [1]. Подрезание почвенного пласта осуществляется лемехом, крошение и оборот – отвалом, устойчивость движения корпуса обеспечивается полевой доской[8] [1]. При этом на долю сопротивления полевой доски приходится до 20 % суммарной составляющей тягового сопротивления корпуса плуга [2; 3].

В статье [3] также подтверждается, что отвальная вспашка относится к наиболее энергоемким технологическим операциям. Авторы рекомендуют для снижения тягового сопротивления корпуса плуга изменить его конструкцию путем применения деформации растяжения подрезаемого почвенного пласта [4; 5]. Возможность замены деформации сжатия путем частичного растяжения несомненно повлияет на снижение энергоемкости процесса.

В засушливых районах на почвах тяжелого механического состава многими учеными рекомендуется заменять отвальную обработку на безотвальное рыхление почвы. По мнению исследователей [6], при безотвальном рыхлении энергозатраты меньше на 22–26 %, чем при отвальной обработке почвы. Одним из направлений экономии энергоресурсов обработки почвы является также совмещение нескольких операций в одном рабочем процессе [7; 8]. При такой операции за один проход агрегата выполняется комбинация мелкой и глубокой обработки почвы.

Энергосбережение при основной безотвальной обработке почвы достигается с помощью использования чизельных рыхлителей [9]. При работе таких орудий крошится почвенный пласт долотом рабочего органа в несколько раз по размеру меньше относительно ширины взрыхленной почвы. Крошение почвы без оборота пласта плоскорезами также снижает затраты энергии на 34 % по сравнению с отвальной вспашкой [10]. Улучшению энергетических показателей работы лемешно-отвального корпуса посвящены исследования В. Г. Черногаева, В. А. Свириной [11], В. П. Дьякова [12].

[6] Панов И. М., Ветохин В. И. Физические основы механики почв. Киев : Феникс, 2008. 266 с.

[7] Там же; Синеоков Г. Н., Панов И. М. Теория и расчет почвообрабатывающих машин. М. : Машиностроение, 1977. 328 с.

[8] Синеоков Г. Н., Панов И. М. Теория и расчет почвообрабатывающих машин.

Для накопления влаги в пахотном слое необходимо управлять пожнивными остатками[9]. Биологическая часть оставшегося на поле урожая должна успеть перегнить к началу будущего сева. Для этого необходимо ее расположить в обработанном слое при лучших условиях поступления атмосферной влаги и кислорода [13]. Отвальная обработка пересушенной тяжелосуглинистой почвы способствует образованию крупных глыб и комков [14]. В такой пашне весьма трудно распределить пожнивные и растительные остатки. Это подтверждается в работах отечественных ученых [15; 16], в которых установлено, что увеличение процесса образования глыб наблюдается в большей степени на сухих почвах. Сохранению влаги внутри пласта и повышению урожайности сельскохозяйственных культур способствует наличие органического слоя, состоящего из измельченных растительных остатков и раскрошенной почвы как на поверхности поля, так и на глубине[10]. Другим недостатком качества процесса обработки сухой суглинистой почвы является увеличение плотности и образование уплотненной зоны в нижних горизонтах пласта [17; 18].

Ученые предлагают [19] усовершенствовать эксплуатационно-технологические показатели отвальных плугов принципиальным улучшением технологии основной обработки почвы за счет новых процессов взаимодействия рабочих органов почвообрабатывающих орудий с пластом почвы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования

Технологический процесс основной отвальной обработки тяжелосуглинистой почвы лемешно-отвальными плугами общего назначения (серийным плугом ПНЛ-8-40 и разработанным плугом ПБС-8М), агрегатируемыми тракторами тягового класса 5.

Материалы

Район УНПО «Поволжье» ФГБОУ ВО Вавиловского университета (с. Степное, Энгельсский р-н, Саратовсая обл.), где выполнялись экспериментальные исследования, располагается в засушливой левобережной зоне Нижнего Поволжья. Опытный участок поля характеризовался тяжелосуглинистыми почвами. Агрофоном служило поле после уборки проса комбайнами с измельчителями-разбрасывателями соломы. Зачетными делянками стали загонки на всем протяжении длины поля, имеющие ровный горизонтальный рельеф. Влажность почвы по глубине обрабатываемого слоя 0–23 см составляла 20,2–22,0 %; масса пожнивных и растительных остатков составляла в среднем 436 г/м^2, а высота стерни – 18 см.

Серийный плуг ПНЛ-8-40 (рис. 1) и разработанный плуг ПБС-8М (рис. 2) агрегатировались тракторами тягового класса 5 К-701. Технологический процесс

[9] Управление заделкой пожнивными остатками при основной обработке почвы в засушливом земледелии / В. М. Бойков [и др.] // Проблемы экономичности и эксплуатации автотракторной техники : материалы XXXVII Междунар. науч.-техн. конф. им. В. В. Михайлова (15–16 мая 2024 г., г. Саратов). Саратов : Изд-во Саратов. гос. ун-та генетики, биотехнологии и инженерии им. Н. И. Вавилова, 2024. С. 166–172. https://elibrary.ru/qxawvk

[10] Русакова И. В. Теоретические основы и методы управления плодородием почв при использовании растительных остатков в земледелии. Владимир : ФГБНУ ВНИИОУ, 2016. 131 с.

вспашки плугом ПНЛ-8-40 от создания плуга и по настоящее время не претерпел особых изменений. Подрезание почвенного пласта осуществляется лемехом, крошение и оборот – отвалом, а устойчивость движения корпуса обеспечивается полевой доской.



Р и с. 1. Навесной серийный плуг ПНЛ-8-40 в агрегате с трактором К-701
F i g. 1. Mounted serial plow PNL-8-40 is combination with K-701 tractor

Источник: фотографии для рисунков 1, 2 сделаны при испытании плугов на поле в селе Степное Энгельсского района Саратовской области С. В. Старцевым в августе 2016 г. (адаптировано из: Бойков В. М., Старцев С. В., Павлов А. В., Нестеров Е. С. Управление заделкой пожнивными остатками при основной обработке почвы в засушливом земледелии[11]).

Source: photos for figures 1, 2 were taken during the testing of plows in the field of Stepnoye village, Engels district, Saratov region, by S. V. Startsev, August 2016 (adapted from: Boikov V. M., Startsev S. V., Pavlov A. V., Nesterov E. S. Management of embedding plant and crop residues during basic tillage in arid agriculture).



Р и с. 2. Навесной разработанный плуг ПБС-8М в агрегате с трактором К-701
F i g. 2. The PBS-8M mounted plow is combined with the K-701 tractor

[11] Управление заделкой пожнивными остатками при основной обработке почвы в засушливом земледелии / В. М. Бойков [и др.].

Разработанный плуг ПБС-8М отличается от серийного ПНЛ-8-40 углом установки основного несущего бруса к направлению движения агрегата и конструкцией рабочего органа. У нового корпуса отсутствует полевая доска, а горизонтальная устойчивость движения осуществляется левым лемехом корпуса с шириной захвата 20 см, установленным со стороны необработанной части почвы. Правый лемех с шириной захвата 40 см выполняет подрезание пласта почвы, а отвал крошит, сдвигает подрезанную почву левым лемехом от впереди идущего корпуса и оборачивает почву. При этом происходит полная заделка пожнивных и растительных остатков.

Методы

Эксплуатационно-технологические показатели лемешно-отвальных плугов определялись в соответствии с СТО АИСТ[12]. Определение производительности плуга выполняли изменением поступательной скорости машинно-тракторного агрегата. Расход топлива регистрировали с момента входа агрегата в зачетную делянку с установившейся скоростью и выхода агрегата из нее.

Процедура исследования

По методике экспериментальных исследований определяли глубину вспашки (рис. 3a) и среднюю высоту растительных и пожнивных остатков на поле (рис. 3b), измерения проводились на пяти участках учетных делянок, расположенных по диагонали загона. Количество стерни и растительных остатков подсчитывали и производили по 10 измерений с погрешностью ± 0,5 см.



a) b)

Р и с. 3. Измерения:
a) глубины пахоты; b) высоты стерни проса (адаптировано из [20])

F i g. 3. Measurements:
a) depth of plowing; b) height of millet stubble (adapted from [20])

Источник: фотографии для рисунков 3, 4 сделаны при испытании плугов на поле в селе Степное Энгельсского района Саратовской области С. В. Старцевым в августе 2016 г.

Source: photos for figures 1, 2 were taken during the testing of plows in the field of Stepnoye village, Engels district, Saratov region, by S. V. Startsev, August 2016.

Глубину заделки пожнивных остатков и площадь их распределения по профилю обрабатываемого пласта почвы измеряли по отвесной стенке вырытой траншеи

[12] СТО АИСТ 4.1-2010. Машины и орудия для глубокой обработки почвы. Методы оценки функциональных показателей. М., 2011. 36 с.; СТО АИСТ 001-2010. Агротехническая оценка сельскохозяйственной техники. Термины и определения [Электронный ресурс]. URL: https://docs.cntd.ru/document/555622479 (дата обращения: 21.10.2024).

перпендикулярно направлению движения агрегата. Перед началом первого прохода движения пахотного агрегата на ширину захвата плуга с помощью шнура устанавливали контрольную линию. Для достоверности измерения распределения стерни по глубине пласта почвы между двумя вешками натянули шнур горизонтально относительно дневной поверхности поля. На шнуре по горизонтали с интервалами 10 см от каждой точки измеряли расстояние по вертикали от поверхности взрыхленной почвы до верхней части нахождения в почве пожнивных остатков, по вертикали – расстояние от дна борозды до нахождения нижней части пожнивных остатков (рис. 4).

Расчет зависимости часовой производительности W_h от скорости движения агрегата определяли по выражению:

$$W_h = 0{,}36\ B_p\ \upsilon_a,\ \text{га/ч}$$

где B_p – ширина захвата плуга, м; υ_a – скорость движения агрегата, м/с.

Расход топлива определяли методом контроля количества топлива в мерном бачке. Перед началом обработки контрольного участка фиксировали объем топлива в бачке, после окончания установили израсходованный объем в бачке. Погектарный расход топлива определяли делением значения расхода топлива на величину производительности агрегата.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ полученных данных по агротехнической оценке технологий с учетом установленных агротехнических требований показывает, что плуг ПНЛ-8-40 без предплужников и плуг ПБС-8М устойчиво работали по глубине, обеспечивали глубину обработки 23,0–23,4 см (укладывается в требования ±2 см, установочная глубина 23 см). Оба плуга так же устойчивы в работе и по ширине захвата – 3,3 м у ПЛН-8-40 и 4,9 м у ПБС-8М. Отклонение фактической рабочей ширины захвата ±4,0 % не превышает агротехнических требований ±10 %. После прохода плуга поверхность пашни оставалась выровненной. Высота гребней после прохода плуга ПЛН-8-40 составила в среднем 6,9 см, после плуга ПБС-8М – 8,2 см, что отвечает требованиям не более 9 см.

Полевыми экспериментами работы пахотного агрегата с серийным плугом ПНЛ-8-40 выявлена неравномерность распределения пожнивных и растительных остатков как по ширине захвата плуга, так и по глубине раскрошенного пахотного слоя. Измельченная солома и стерня находились между глыбами и комьями почвы. По глубине солома располагалась на расстоянии от 12 до 22 см, причем находилась как в наклоненном, так и в горизонтальном положениях. Контроль качества поверхности пашни показал наличие пожнивных остатков проса в рядах смыкания пластов почвы на расстоянии 30–60 см.

Агротехническая оценка степени заделки пожнивных остатков после прохода плуга ПБС-8М на этом же поле показала, что солома и стерня расположены слоем 5–12 см на глубине 8–15 см в вертикально-поперечной плоскости сечения обработанного пласта.

После уборки проса осенью поле было полностью обработано по отвальной технологии с разделением контрольных участков вспашки агрегатами К-701+ПНЛ-8-40 и К-701+8М. Весной следующего года поле находилось под черным паром, где до посева озимой пшеницы выполнены две культивации с боронованием.

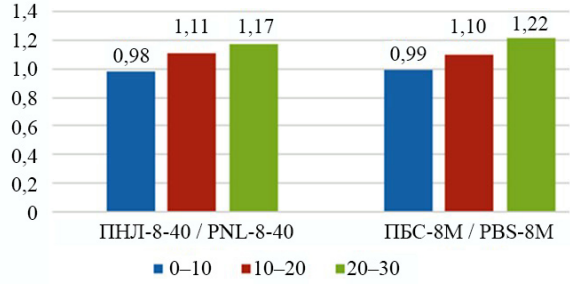


a) d)

Р и с. 4. Исследование заделки стерни:
a) вспашка плугом ПНЛ-8-40; b) вспашка плугом ПБС-8М (адаптировано из [20])

F i g. 4. Research of plowing in stubble incorporation:
a) plowing with the PNL-8-40 plow; b) plowing with the PBS-8M plow (adapted from [20])

После осенней обработки опытных участков серийным плугом ПНЛ-8-40 и разработанным плугом ПБС-8 весной будущего года проведена оценка водно-физических свойств почвы[13]. После выполнения операций первой культивации пара (рис. 5) и перед посевом озимой пшеницы (рис. 6) плотность почвы была практически равнозначной.



Р и с. 5. Диаграмма изменения плотности почвы (г/см^3)
в слое 0–30 см перед первой культивацией

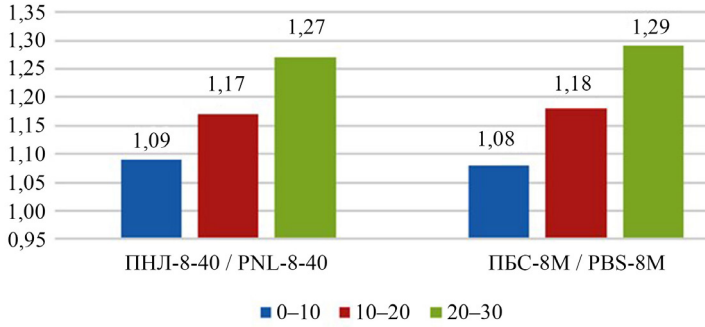
F i g. 5. Diagram of changes in soil density (g/cm^3)
in the 0–30 cm layer before the first cultivation

Источник: диаграммы для рисунков 5–8 составлены авторами статьи (адаптировано из: Бойков В. М., Старцев С. В., Павлов А. В., Нестеров Е. С. Управление заделкой пожнивными остатками при основной обработке почвы в засушливом земледелии[14]).

Source: the diagrams for figures 5–8 were created by the authors of the article (adapted from: Boikov V. M., Startsev S. V., Pavlov A. V., Nesterov E. S. Management of planting crop residues during basic tillage in arid agriculture).

[13] Левкина А. Ю. Приемы повышения урожайности и качества зерна озимой пшеницы при минимизации основной обработки чистого пара в Нижнем Поволжье : автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Саратов, 2021. 20 с.

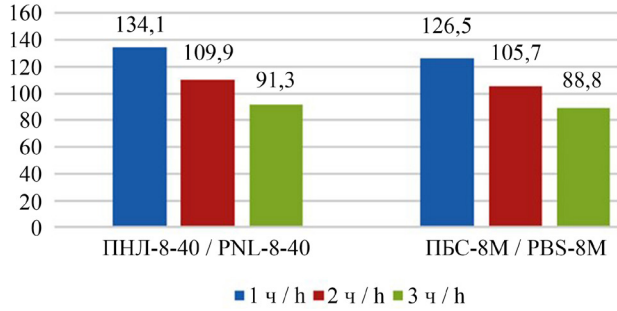
[14] Управление заделкой пожнивными остатками при основной обработке почвы в засушливом земледелии / В. М. Бойков [и др.].



Р и с. 6. Диаграмма изменения плотности почвы (г/см^3) в слое 0–30 см перед посевом озимой пшеницы

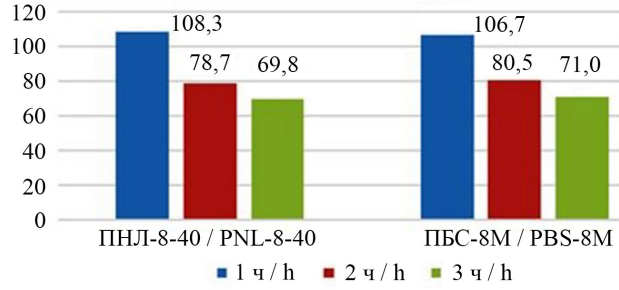
F i g. 6. Diagram of changes in soil density (g/cm^3) in the 0–30 cm layer before sowing winter wheat

Показатели водопроницаемости почвы в этих периодах у плуга ПНЛ-8-40 несколько выше (рис. 7). За первый час водопроницаемость в обработанном ПНЛ-8-40 пласте после первой культивации составила на 5,7 % больше, чем после обработки почвы плугом ПБС-8М. Перед посевом озимой пшеницы значения показателей практически выравнивались (рис. 8).



Р и с. 7. Диаграмма изменения водопроницаемости почвы после первой культивации, мм/ч

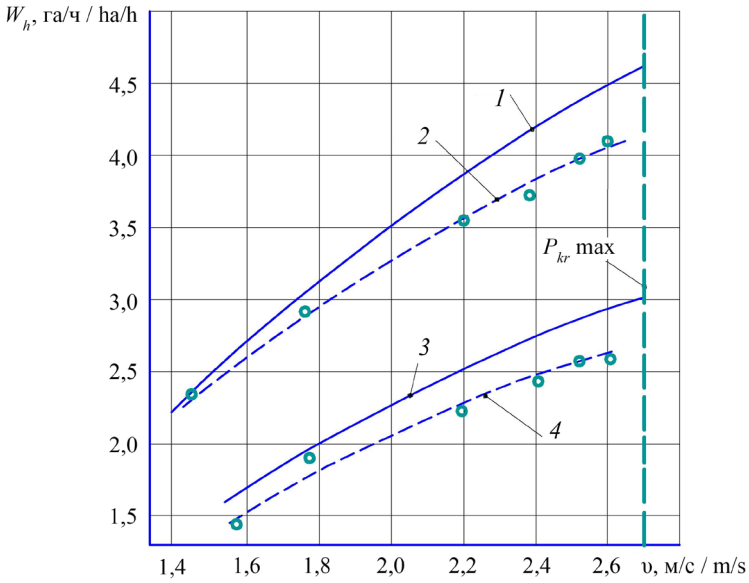
F i g. 7. Diagram of changes in soil water permeability after the first cultivation, mm/h



Р и с. 8. Диаграмма изменения водопроницаемости почвы перед посевом озимой пшеницы, мм/ч

F i g. 8. Diagram of changes in soil water permeability before sowing winter wheat, mm/h

Экспериментально-теоретическими исследованиями эксплуатационных показателей агрегатов с плугами ПНЛ-8-40 и ПБС-8М с трактором тягового класса 5 К-701 установлена производительность за час основного времени разработанного восьмикорпусного плуга ПБС-8М на 30–33 % выше производительности серийного восьмикорпусного плуга ПНЛ-8-40 (рис. 9). На скорости 2,53 м/с К-701+ПНЛ-8-40 погектарный расход топлива составил 17,4 кг/га, ниже на 22 % 701+ПБС-8М – 13,6 кг/га.



Р и с. 9. Зависимость производительности от скорости агрегатов с плугами:
1 – теоретическая ПБС-8М; *2* – экспериментальная ПБС-8М;
3 – теоретическая ПНЛ-8-40; *4* – экспериментальная ПНЛ-8-40;
P_{kr} max – граница максимального тягового усилия трактора К-701

F i g. 9. Dependence of productivity on the speed of units with plows:
1 – theoretical PBS-8M; *2* – experimental PBS-8M; *3* – theoretical PNL-8-40;
4 – experimental PNL-8-40; P_{kr} max – the limit of the maximum traction force of the tractor K-701

Источник: график построен авторами статьи.
Source: the graph is constructed by the authors of the article.

Проведенные исследования эксплуатационно-технологических показателей лемешно-отвальных плугов общего назначения серийного ПНЛ-8-40 и разработанного ПБС-8М подтвердили возможность снижения энергозатрат и улучшения агрофизических свойств обработанной тяжелосуглинистой почвы в засушливых условиях левобережной зоны Поволжья. Полученная урожайность озимой пшеницы не снижается, по обработанной плугом ПБС-8М почве за 2018–2020 гг. в среднем получено 24,0 ц/га, по обработанной плугом ПНЛ-8-40 почве – 23,5 ц/га[15].

[15] Левкина А. Ю. Приемы повышения урожайности и качества зерна озимой пшеницы при минимизации основной обработки чистого пара в Нижнем Поволжье.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате обработки тяжелосуглинистой почвы в засушливых условиях левобережной зоны Поволжья установлена возможность снижения энергозатрат и улучшение агрофизических свойств почвы разработанным лемешно-отвальным плугом ПБС-8М. Часовая производительность при рабочей скорости агрегата 2,53 м/с, составила у К-701+ПБС-8М 3,94 га, у К-701+ПНЛ-8-40 – 2,6 га. Погектарный расход топлива на этом режиме составил 13,6 кг/га при работе К-701+ПБС-8М и 17,4 кг/га при работе К-701+ПНЛ-8-40. Снижены затраты топлива на каждом гектаре в размере 3,8 кг. Анализ полученных технологических показателей выявил, что оба плуга обеспечивали глубину обработки на уровне 23,0–23,4 см равномерно по всей ширине захвата машин. Отклонение фактической ширины захвата от конструктивной составляло 4,0 %, что свидетельствует об устойчивости плугов в работе. Гребнистость поверхности поля равнялась 6,9–8,2 см. Степень заделки растительных и пожнивных остатков проса в почву у плугов различалась как по глубине, так и по ширине захвата плуга. После прохода плуга ПБС-8М стерня распределена слоем 5–12 см на глубине 8–15 см, после прохода плуга ПНЛ-8-40 стерня находилась ближе ко дну борозды от 12 до 22 см. После зяблевой вспашки почвы агрегатами с серийным и разработанным плугами к весенней посевной компании улучшились показатели почвы, отразившиеся на урожайности возделываемой культуры 23,5–24,0 ц/га.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев В.В., Максимов И.И., Максимов В.И., Сякаев И.В. Энергетическая оценка механического воздействия на почву почвообрабатывающих машин и орудий. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока.* 2012;(3). URL: https://clck.ru/3NqGW6 (дата обращения: 21.10.2024).
2. Нуралин Б.Н., Олейников С.В., Мурзагалиев А.Ж., Константинов М.М., Трофимов И.В. Энергетическая и агротехническая оценка работы плугов с ромбовидными и серийными рабочими органами. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета.* 2016;(3):81–84. URL: https://reader.lanbook.com/journalArticle/303613#1 (дата обращения: 21.10.2014).
3. Щиров В.Н., Пархоменко Г.Г. Проектирование рабочих органов для рыхления почвы с использованием деформаций растяжения. *Вестник АПК Ставрополья.* 2016;(3):57–62. https://elibrary.ru/xccezd
4. Алдошин Н.В., Васильев А.С., Голубев В.В. Исследование пределов прочности почвы на сжатие и растяжение. *Агроинженерия.* 2020;(3):27–33. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2020-3-27-33
5. Пархоменко Г.Г. Исследование крошения почвы при использовании новых рабочих органов. *Тракторы и сельхозмашины.* 2019;86(2):27–34. https://doi.org/10.31992/0321-4443-2019-2-27-34
6. Кузыченко Ю.А. Энергетические показатели крошения почвы при обработке в пропашном звене севооборота в зоне Центрального Предкавказья. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета.* 2020(3):188–191. https://doi.org/10.37670/2073-0853-2020-83-3-188-191
7. Трофимова Т.А., Коржов С.И. Ресурсосберегающие технологии обработки почвы. *Лесотехнический журнал.* 2014;(1):200–208. https://doi.org/10.12737/3370
8. Жученко А.В., Оберемок В.А. Комбинированный способ основной обработки почвы и сравнительная энергетическая оценка различных технологических процессов обработки почвы. *Научный журнал КубГАУ.* 2016;(116):373–386. https://elibrary.ru/vquvnx
9. Бородычев В.В., Шевченко В.А., Новиков А.Е., Ламскова М.И., Филимонов М.И. Энергетическая оценка тягово-эксплуатационных показателей чизельных и лемешных орудий на тяжелосуглинистых орошаемых почвах. *Плодородие.* 2017;(6):31–34. https://elibrary.ru/ymjwmt
10. Борин А.А., Лощинина А.Э. Перспективные технологии обработки почвы. *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение.* 2015;(2):130–134. https://elibrary.ru/scfumm

11. Черногаев В.Г., Свирина В.А. Сравнительный анализ эффективности применения различных способов обработки почвы в системе ресурсосберегающих технологий земледелия. *Аграрная наука.* 2020;(11–12):105–107. https://doi.org/10.32634/0869-8155-2020-343-11-105-107
12. Дьяков В.П. О результатах исследований деформирования почвы рабочими органами машин и орудиями технологических комплексов. *Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии.* 2017;(8):42–46. URL: https://clck.ru/3NqLz9 (дата обращения: 21.10.2024).
13. Пегова Н.А. Влияние систем основной обработки дерново-подзолистой почвы, вида пара и соломы на урожайность культур звена севооборота. *Пермский аграрный вестник.* 2019;(4):65–75. https://elibrary.ru/bydrry
14. Петелько А.И. Влияние глубины промерзания почвы на формирование стока талых вод. *Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки.* 2017;(18). URL: https://clck.ru/3NqNLU (дата обращения: 25.10.2024).
15. Швабауэр Ю.А., Субботин С.И., Гапич Д.С., Фомин С.Д. Экспериментальная установка для исследования чизельного агрегата, оборудованного рабочими органами с улучшенными геометрическими характеристиками. *Известия нижневолжского агроуниверситетского комплекса.* 2024;(2):394–406. https://elibrary.ru/ggrjos
16. Кузыченко Ю.А., Катков К.А. Технологический показатель работы МТА при обработке почвы в условиях Предкавказья. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета.* 2022;(2):134–138. https://doi.org/10.37670/2073-0853-2022-94-2-134-138
17. Борисенко И.Б., Доценко А.Е., Борисенко П.И., Новиков А.Е. Чизелевание почвы: перспективные орудия и способы возделывания широкорядных пропашных культур. *Аграрный научный журнал.* 2015;(7):41–45. https://elibrary.ru/ubotqj
18. Скороходов В.Ю. Уровень продуктивной влаги в зависимости от предшественника, срока и вида обработки почвы на черноземах южных Оренбургского Предуралья. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета.* 2020;(1):13–19. https://doi.org/10.37670/2073-0853-2020-81-1-13-19
19. Бойков В.М., Старцев С.В. Разработка лемешно-отвальных плугов для тракторов тягового класса 5. *Аграрный научный журнал.* 2024;(11):113–119. https://dx.doi.org/10.28983/asj.y2024i11pp113-119
20. Бойков В.М., Старцев С.В., Павлов А.В., Нестеров Е.С. Результаты исследований заделки пожнивных остатков зерновых культур плугами ПЛН и ПБС. *Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии.* 2023;8(2):25–30. https://doi.org/10.55170/19973225_2023_8_2_25

Об авторах:

Старцев Сергей Викторович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технического обеспечения АПК Саратовского государственного университета генетики, биотехнологии и инженерии имени Н. И. Вавилова (410012, Российская Федерация, г. Саратов, пр. им. Петра Столыпина, 4/3), ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3310-0035, Scopus ID: 57212200354, Researcher ID: JWA-0022-2024, SPIN-код: 4856-1685, kingofscince@yandex.ru

Павлов Андрей Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры технического обеспечения АПК Саратовского государственного университета генетики, биотехнологии и инженерии имени Н. И. Вавилова (410012, Российская Федерация, г. Саратов, пр. им. Петра Столыпина, 4/3), ORCID: https://orcid.org/0009-0001-4447-3964, SPIN-код: 2916-7482, andrej.pavloff2015@yandex.ru

Нестеров Евгений Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры технического обеспечения АПК Саратовского государственного университета генетики, биотехнологии и инженерии имени Н. И. Вавилова (410012, Российская Федерация, г. Саратов, пр. им. Петра Столыпина, 4/3), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0870-7516, SPIN-код: 9820-4786, nesterov21@mail.ru

Вклад авторов:

С. В. Старцев – формулирование идеи исследования, целей и задач; осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор доказательств; создание и подготовка рукописи: критический анализ черновика рукописи, внесение замечаний и исправлений членами исследовательской группы, в том числе на этапах до и после публикации.

А. В. Павлов – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор доказательств; создание и подготовка рукописи: написание черновика рукописи, включая его перевод на иностранный язык.

Е. С. Нестеров – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение расчетов и экспериментов и сбор доказательств; создание и подготовка рукописи: работа над графиками, написание черновика рукописи, включая его перевод на иностранный язык.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила в редакцию 07.03.2025; поступила после рецензирования 26.03.2025; принята к публикации 04.04.2025

REFERENCES

1. Alekseev V.V., Maksimov I.I., Maksimov V.I., Syakaev I.V. Energy Estimation of Mechanical Impact on the Soil by Tillage Machines and Tools. *Agricultural Science Euro-North-East.* 2012;(3). (In Russ., abstract in Eng.) Available at: https://clck.ru/3NqGW6 (accessed 21.10.2024).
2. Nuralin B.N., Oleinikov S.V., Murzagaliev A.Zh., Konstantinof M.M., Trofimov I.V. [Energy and Agrotechnical Assessment of the Work of Plows with Diamond-Shaped and Serial Working Bodies]. *Izvestiya Orenburg State Agrarian University.* 2016;(3):81–84. (In Russ.) Available at: https://reader.lanbook.com/journalArticle/303613#1 (accessed 21.10.2014).
3. Shchirov V.N., Parkhomenko G.G. Designing of the of Working Bodies for Loosening Soil Using the Deformationtensile. *Vestnik APK Stravropol'ya.* 2016;(3):57–62. (In Russ., abstract in Eng.) https://elibrary.ru/xccezd
4. Aldoshin N.V. Vasiliev A.S., Golubev V.V. Studies on Compressive and Tensile Strength of the Sod-Podzolic Soil. *Agricultural Engineering.* 2020;(3):27–33. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.26897/2687-1149-2020-3-27-33
5. Parhomenko G.G. The Study of Soil Crumbling when Using New Working Bodies. *Tractors and Agricultural Machinery.* 2019;86(2):27–34. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.31992/0321-4443-2019-2-27-34
6. Kuzychenko Yu.A. Energy Parameters of Soil Crumbling on a Treated Plot of Root-Crop Rotation in the Process of Cultivation in the Zone of Central Predkavkazye. *Izvestiya Orenburg State Agrarian University.* 2020(3):188–191. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.37670/2073-0853-2020-83-3-188-191
7. Trofimova T.A., Korzhov S.I. Resource Saving Tillage Technologies. *Forestry Engineering Journal.* 2014;(1):200–208. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.12737/3370
8. Zhuchenko A.V., Oberemok V.A. Combined Primary Tillage and Comparative Energy Evaluation of Different Technological Processes of Soil Treatment. *Scientific Journal of KubSAU.* 2016;(116):373–386. (In Russ., abstract in Eng.) https://elibrary.ru/vquvnx
9. Borodychev V.V., Shevchenko V.A., Novikov A.E., Lamskova M.I., Filimonov M.I. Modeling and Energy Assessment of Traction-Exploitation Indicators of Serial Chisel Implement and Plows. *Plodorodie.* 2017;(6):31–34. (In Russ., abstract in Eng.) https://elibrary.ru/ymjwmt
10. Borin A.A., Loshchinina A.E. Advanced Soil Cultivation Technologies. *Modern High Technologies. Regional Application.* 2015;(2):130–134. (In Russ., abstract in Eng.) https://elibrary.ru/scfumm
11. Chernogaev V.G., Svirina V.A. Comparative Analysis of the Efficiency of Application of Different Methods of Tillage in the System of Resource-Saving Agriculture Technologies. *Agrarian Science.* 2020;(11–12):105–107. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.32634/0869-8155-2020-343-11-105-107
12. Dyakov V.P. On the Results of Studies of Soil Deformation by Working Bodies of Machines and Tools of Technological Complexes. *Bulletin of the Kursk State Agricultural Academy.* 2017;(8):42–46. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: https://clck.ru/3NqLz9 (accessed 21.10.2024).
13. Pegova N.A. Influence of Basic Tillage Systems of Sod-Podzolic Soil, the Type of Fallow and Straw on Crop Yield Capacity of Crop Rotation Link. *Perm Agrarian Journal.* 2019;(4):65–75. (In Russ., abstract in Eng.) https://elibrary.ru/bydrry

14. Petelko A.I. Influence of the Depth of Soil Freezing on the Formation of Meltwater Runoff. *Belgorod State University. Scientific Bulletin. Series: Natural sciences.* (In Russ., abstract in Eng.) Available at: https://clck.ru/3NqNLU (accessed 25.10.2024).
15. Shvabauer Yu.A., Subbotin S.I., Gapich D.S., Fomin S.D. Experimental Installation for the Study of a Chisel Unit Equipped with Working Bodies with Improved Geometric Characteristics. *Izvestia of the Lower Volga Agro-University Complex.* 2024;2(74):394–406. (In Russ., abstract in Eng.) https://elibrary.ru/ggrjos
16. Kuzychenko Yu.A., Katkov K.A. Technological Indicator of the Work of the MTU During Tillage in the Conditions of the Pre-Caucasus. *Izvestia Orenburg State Agrarian University.* 2022;(2):134–138. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.37670/2073-0853-2022-94-2-134-138
17. Borisenko I.B., Dotsenko A.E., Borisenko P.I., Novikov A.E. Chizeling: Advanced Tools and Harvesting Methods in Wide Row Crops. *Agrarian Scientific Journal.* 2015;(7):41–45. (In Russ., abstract in Eng.) https://elibrary.ru/ubotqj
18. Skorokhodov V.Yu. The Level of Productive Moisture Depending on the Predecessor, the Period and Type of Tillage on Chernozems of the Southern Orenburg Urals. *Izvestiya of the Orenburg State Agrarian University.* 2020;(1):13–19. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.37670/2073-0853-2020-81-1-13-19
19. Boikov V.M., Startsev S.V. Development of Ploughshares for Tractors of Drawbar Category 5. *Agrarian Scientific Journal.* 2024;(11):113–119. (In Russ., abstract in Eng.) https://dx.doi.org/10.28983/asj.y2024i11pp113-119
20. Boykov V.M., Startsev S.V., Pavlov A.V., Nesterov E.S. The Results of Studies of the Crop Residues Sealing of Grain Crops with PLN and PBS Plows. *Bulletin Samara State Agricultural Academy.* 2023;8(2):25–30. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.55170/19973225_2023_8_2_25

About the authors:

Sergey V. Startsev, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Technical Support of the Agroindustrial Complex, Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N. I. Vavilov (4/3 Prospekt im. Peter Stolypin, Saratov 410012, Russian Federation), ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3310-0035, Scopus ID: 57212200354, Researcher ID: JWA-0022-2024, SPIN-code: 4856-1685, kingofscince@yandex.ru

Andrey V. Pavlov, Cand.Sci, (Eng.), Associate Professor of the Department of Technical Support for the Agro-Industrial Complex, Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N. I. Vavilov (4/3 Prospekt im. Peter Stolypin, Saratov 410012, Russian Federation), ORCID: https://orcid.org/0009-0001-4447-3964, SPIN-code: 2916-7482, andrej.pavloff2015@yandex.ru

Evgeny S. Nesterov, Cand.Sci, (Eng.), Associate Professor of the Department of Technical Support of the Agroindustrial Complex, Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N. I. Vavilov (4/3 Prospekt im. Peter Stolypin, Saratov 410012, Russian Federation), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0870-7516, SPIN-code: 9820-4786, nesterov21@mail.ru

Authors contribution:

S. V. Startsev – formulating the study idea, aims and objectives; conducting the study, specifically performing the experiments and collecting data/evidence; preparing the article manuscript: critical analysis of the manuscript and of comments and corrections made by the members of the research group during the pre-publication and post-publication stages.

A. V. Pavlov – conducting the study, specifically performing the experiments, and collecting data/evidence; preparing the manuscript, specifically writing the initial manuscript version (including its translation into the English language).

E. S. Nesterov – conducting the study, specifically performing the experiments and collecting data/evidence; preparing the manuscript, working on charts, specifically writing the initial manuscript version (including its translation into the English language).

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 07.03.2025; revised 26.03.2025; accepted 04.04.2025

https://vestnik.mrsu.ru ISSN 2658-4123, eISSN 2658-6525

ТРЕНИЕ И ИЗНОС В МАШИНАХ / FRICTION AND WEAR IN MACHINES

https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202503.529-553
EDN: https://elibrary.ru/bypvzg
УДК 620.193/.197:629.7.035.5

Оригинальная статья / Original article

Закон распределения коррозии узлов сельскохозяйственной техники при воздействии солевого тумана

Н. В. Лимаренко ✉, **Д. Н. Савенков, Д. И. Гладких, А. А. Щербаков**
Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
✉ *nlimarenko@donstu.ru*

Аннотация

Введение. Развитие агропромышленного комплекса требует повышения эффективности использования машинотракторного парка. При этом необходимо учитывать коррозионные процессы, ускоряющие износ техники. Существующие методы оценки состояния основаны на эмпирических данных и не обеспечивают точного прогнозирования. Внедрение искусственного интеллекта и цифровых решений позволит автоматизировать испытания, сократить затраты и повысить точность оценки деградации, вызванной коррозионными процессами.

Цель исследования. Определить соответствие экспериментальных данных по влиянию солевого тумана на коррозию узлов сельхозтехники закону распределения на примере выключателей заднего хода.

Материалы и методы. Объектом исследования выбраны выключатели света заднего хода, широко используемые в сельскохозяйственной технике. Исследования проводились в камере солевого тумана с параметрами, соответствующими ГОСТ Р 52230 и ГОСТ 9.302, в течение 200 ч с промежуточными осмотрами каждые 48 ч. Во время испытаний определена степень коррозии, вычисленная по площади поврежденных участков. Математические методы включали вычисление среднего, медианы, дисперсии, стандартного отклонения, асимметрии, эксцесса и размаха выборки.

Результаты исследования. В результате испытаний была подтверждена работоспособность образцов и проведена оценка соответствия данных закону распределения Вейбулла. Экспериментально удалось установить, что активная фаза деградации поверхности выключателей заднего хода возрастает начиная с 96 ч экспозиции в камере солевого тумана, что связано с разрушением защитных покрытий и развитием питтинговой коррозии. Использование квадратичной регрессионной модели позволило описать зависимость коррозионных повреждений от времени экспозиции.

Обсуждение и заключение. Статистический анализ выборки подтвердил соответствие распределения Вейбулла, что позволяет прогнозировать дальнейшее распространение коррозии и улучшить оценку работоспособности изделий в условиях солевого тумана. Полученные параметры позволяют прогнозировать ресурс узлов.

© Лимаренко Н. В., Савенков Д. Н., Гладких Д. И., Щербаков А. А., 2025

Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Результаты исследования создают основу для создания цифровых двойников и адаптивных систем обслуживания с использованием искусственного интеллекта, минимизирующих простои техники.

Ключевые слова: ресурсные испытания сельскохозяйственной техники, ускоренные ресурсные испытания, воздействия солевым туманом, коррозия в сельскохозяйственных машинах

Финансирование: исследование выполнено в рамках реализации Грантового проекта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации 075-03-2025-302/1 от 25.03.2025.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Лимаренко Н.В., Савенков Д.Н., Гладких Д.И., Щербаков А.А. Закон распределения коррозии узлов сельскохозяйственной техники при воздействии солевого тумана. *Инженерные технологии и системы.* 2025;35(3):529–553. https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202503.529-553

Distribution Law of Corrosion of Agricultural Machinery Components under the Influence of Salt Spray

N. V. Limarenko ✉, **D. N. Savenkov, D. I. Gladkih, A. A. Shcherbakov**
Don State Technical University, *Rostov-on-Don*, *Russian Federation*
✉ *nlimarenko@donstu.ru*

Abstract

Introduction. The development of the agro-industrial complex until 2030 requires increasing the efficiency of the machine and tractor fleet with account for corrosion processes accelerating equipment wear. Existing assessment methods are based on empirical data and do not provide accurate forecasting. The introduction of AI and digital solutions will automate testing, reduce costs and improve the accuracy of assessing degradation caused by corrosion processes.

Aim of the Study. The aim is to determine the compliance of experimental data on the effect of salt spray on the corrosion of agricultural machinery components with the distribution law through the example of reversing light switches.

Materials and Methods. The object of study was reversing light switches widely used in agricultural machinery. The studies were carried out in a salt spray chamber with parameters corresponding to GOST R 52230 and GOST 9.302 for 200 hours with intermediate inspections every 48 hours. During the tests, the degree of corrosion was determined, calculated by the area of damaged sections. Using mathematical methods there was calculated the mean deviation, median, variance, standard deviation, skewness, kurtosis, and range of the sample.

Results. As a result of the tests, the operability of the samples was confirmed and the obtained data compliance with the Weibull distribution law was assessed. It was experimentally established that the active phase of surface degradation of reversing light switches increases starting from 96 hours of exposure in the salt spray chamber that is caused by the destruction of protective coatings and progress of pitting corrosion. The use of a quadratic regression model made it possible to describe the dependence of corrosion damage on exposure time.

Discussion and Conclusion. The statistical analysis of the sample confirmed Weibull distribution fit that makes it possible to predict further corrosion progress and improve performance assessment of products in salt spray conditions. Obtained parameters allow predicting the resource of components. The results of the study provide a basis for creating digital twins and adaptive maintenance systems using artificial intelligence, which minimize machinery downtime.

Keywords: resource testing of agricultural machinery, accelerated resource testing, salt spray exposure, corrosion in agricultural machinery

Funding: The study was carried out within the framework of the implementation of the Grant Project of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation 075-03-2025-302/1 dated 03.25.2025.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

For citation: Limarenko N.V., Savenkov D.N., Gladkih D.I., Shcherbakov A.A. Distribution Law of Corrosion of Agricultural Machinery Components under the Influence of Salt Spray. *Engineering Technologies and Systems*. 2025;35(3):529–553. https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202503.529-553

ВВЕДЕНИЕ

Выполнение требований Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации[1], увеличение объемов экспорта сельхозпродукции, вовлечение новых земель в сельскохозяйственный оборот, а также внедрение цифровых сервисов является ключевым для принятой Стратегии развития агропромышленного и рыбохозяйственного комплексов[2]. Основываясь на экспертных оценках ФГБНУ «Росинформагротех», Росстата к 2030 г. планируется увеличение объема экспорта сельскохозяйственной продукции до 41 млрд долл., что на 30 % выше текущей отметки. Наряду с наращиванием экспортного потенциала стратегически важной задачей является вовлечение в сельскохозяйственный оборот не менее 13,2 млн га земли к 2030 г.

Учитывая масштабы и агроклиматические особенности посевных площадей Российской Федерации, на которых осуществляется эксплуатация машинотракторного парка, необходимым является предложение программно-аппаратных технических решений, направленных на повышение эффективности использования их эксплуатационного потенциала [1; 2]. Как показал анализ практик [3–5], а также результаты предварительных исследований[3], одной из наиболее частых причин отказа является образование коррозии на рабочих органах и основных компонентах машин в результате агрессивных воздействий вешних сред. Известно [6; 7], что коррозионное воздействие на узлы и агрегаты сельскохозяйственной техники запускается комплексом негативных воздействий, среди которых ультрафиолетовое облучение [8; 9], мелкодисперсные абразивы [6; 10], влажность и химические

[1] Доктрина продовольственной безопасности Российской Федерации [Электронный ресурс]. URL: https://docs.cntd.ru/document/564161398?marker=65A0IQ (дата обращения: 21.10.2024).

[2] Стратегия развития агропромышленного и рыбохозяйственного комплексов Российской Федерации на период до 2030 года [Электронный ресурс]. URL: http://government.ru/docs/46497/ (дата обращения: 25.02.2025).

[3] Способы и инструменты повышения эксплуатационной эффективности узлов и агрегатов сельскохозяйственной техники : моногр. / Н. В. Лимаренко [и др.]. Ростов-на-Дону, 2024. URL: https://clck.ru/3PDXuU (дата обращения: 28.03.2025).

удобрения [9–11]. Перечисленное приводит к снижению эксплуатационного ресурса и увеличению затрат на техническое обслуживание и ремонт. Соответственно, проведение ресурсных испытаний деталей, компонентов и узлов сельскохозяйственной техники, направленное на прогнозирование остаточного ресурса и оценку коррозионной стойкости в различных условиях эксплуатации является необходимым, но не достаточным условием реализации эксплуатационного потенциала. Кроме проведения ускоренных ресурсных испытаний необходима разработка предиктивных математических моделей, позволяющих сформировать массивы размеченных данных, которые будут положены в основу элементов искусственного интеллекта (ИИ) и прикладных программных продуктов. Как показал анализ информационных источников [12–15], применяемые сегодня средства и методы оценки состояния технических средств, эксплуатируемых в агропромышленный комплекс (АПК), основаны на эмпирических зависимостях и прямом наблюдении [16–18], что не позволяет с достаточной точностью прогнозировать поведение сложных технических систем в условиях внешних агрессивных сред. Установлено, что внедрению цифровых решений, способных автоматизировать проведение натурных испытаний, препятствуют значительные финансовые затраты на приобретение и обслуживание испытательного оборудования, создание массивов данных их разметки, нормировке и последующей математической формализации. Кроме этого присутствует сложность интерпретации полученных результатов при масштабировании на реальные условия эксплуатации [15; 18]. Практика показывает важность внедрения элементов ИИ в процессы моделирования и прогнозирования коррозионных процессов, проявляемых при эксплуатации сельскохозяйственной техники, позволяющих существенно сократить временные и финансовые затраты на ресурсные испытания, а также повысить точность и достоверность последующей оценки. Научная проблема состоит в необходимости иметь унифицированные и достоверные инструменты разметки и нормировки результатов ускоренных ресурсных испытаний для каждого конкретного узла, компонента и агрегата. Согласно данным исследований [19–21] определение закона распределения плотности вероятностей тех или иных параметров, характеризующих отказ или деградацию детали, компонента или узла сельскохозяйственной машины, не подчиняется закону нормального (Гауссовского) распределения[4]. В работах [19, 22] отмечен положительный опыт использования законов нормального распределения, распределения Релея и Вейбулла для описания рассматриваемых процессов [23]. Соответственно, определение принадлежности параметрических выборок закону распределения с последующим подбором его параметров является актуальной и значимой научной задачей, способной внести вклад в развитие прикладных цифровых решений для АПК.

Цель исследования – определить параметры соответствия экспериментальных данных, обобщающих влияния солевого тумана на коррозию узлов сельскохозяйственной техники, на примере выключателей заднего хода закону распределения.

[4] Рабинович А. Ш., Сельцер А. А., Шаровский А. А. Методические указания по оценке, прогнозированию и нормированию ресурса и безотказности сельскохозяйственной техники. М.: ГОСНИТИ, 1975. 272 с.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

– определить параметры экспозиции образцов в солевом тумане (режимы, продолжительность, метрики и инструментарий контроля, критерии отказа);

– осуществить статистическое моделирование, включающее проверку полученных выборок критерию согласия (К–С/χ^2), выявление критических интервалов и оценку соответствия результатов закону распределения Вейбулла;

– провести инженерную интерпретацию, включающую прогноз ресурса и технического обслуживания исследуемых компонентов в соответствии с полученными экспериментально данными.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Известно, что ресурсные испытания являются критически важным этапом проектирования и производства сельскохозяйственной техники, обеспечивая прогнозирование срока службы, выявление слабых мест конструкции и оптимизацию технических характеристик.

Одним из технологических трендов повышения эффективности ресурсных испытаний является развитие методов имитационного моделирования [24–26] и цифровых двойников [27; 28], позволяющих проводить исследования на основе математических моделей и компьютерных симуляций [29].

Активное внедрение получают контрольно-измерительные комплексы состояния оборудования и прогнозирования ресурса, включающие методы неразрушающего контроля и алгоритмов машинного обучения [30; 31]. Использование данного комплекса технологий для мониторинга текущего состояния рабочих органов сельскохозяйственной техники и других ее значимых компонентов позволяет снизить риски отказов до 60 % [16; 31]. Однако реализация архитектуры данных решений требует создания адекватных математических моделей, учитывающих значительное число факторов, влияющих на ресурс конкретного агрегата и компонента. Попытки формализовать подобные исследования предприняты в работах отечественных ученых [19; 23]. С математической точки зрения сложность в формализации данных процессов состоит в отсутствии четких рекомендаций по использованию того или иного математического аппарата [2; 9; 17]. По данной причине цифровизация и интеллектуализация данных процессов продвигается достаточно низкими темпами. Так, несмотря на представительность полученных результатов [18; 23], исследования не позволяют получить закономерности, определяющие основу моделирования физических явлений на составные элементы сельскохозяйственной техники.

В результате проведенного анализа информационных источников [15; 26; 27] установлено, что для прогнозирования коррозионной стойкости узлов сельскохозяйственной техники при воздействии солевого тумана стоит оценивать не только скорость разрушения материала, но и создание инструмента, позволяющего прогнозировать динамику коррозионного износа с учетом совокупности факторов, таких как состав материала, условия эксплуатации и продолжительность воздействия агрессивной среды.

Стоит отметить, что научные исследования зарубежных коллективов [30–32] в период с 2020 по 2024 гг. позволили значительно расширить понимание не только

общих закономерностей и зависимостей, но и механизмов [33–35] коррозионного разрушения и износа [36; 37] узлов сельскохозяйственной техники. Так, в отечественных и зарубежных работах [38–40] представлены принципы возникновения и протекания коррозионных процессов. Ряд авторов предлагает применение метода электрохимической импедансной спектроскопии для определения влияния концентраций солевого тумана ($NaCl \geq 3,5$ %) на порог активации коррозии для низколегированных сталей, широко применяемых в сельхозмашиностроении и ее питтингового проявления. Представляет интерес диссертационное исследование А. С. Барчуковой[5], в котором отмечается, что наибольшее влияние на динамику коррозии сельскохозяйственных машин оказывает комплекс воздействий в виде повышенной влажности, температурных колебаний, а также остатки удобрений. Предлагается в зависимости от специфики эксплуатации сельскохозяйственных машин корректировать состав удобрений и антикоррозионных покрытий. Р. Сан и др. [32], а также российские ученые [40–42] отмечают, что глубина коррозионных поражений при продолжительности испытаний свыше 500 ч способна достигать глубины свыше 1,2 мм, что существенно превышает допустимые нормы. Обобщив результаты исследований [8; 12; 40], можно сделать вывод, что влияние комбинированного воздействия коррозии и вибрационных нагрузок наиболее достоверно моделирует реальные условия работы большинства сельскохозяйственных машин. Например, экспериментальные исследования показали, что при частоте вибраций 25–35 Гц (характерной для работы культиваторов) скорость коррозионного растрескивания способна увеличиваться более на 30 % по сравнению со статическими условиями [6; 34; 42]. Практика показывает, что в значительной мере развитию коррозии подвержены сварные соединения, трещины в которых развиваются по границам зерен аустенита[6]. Сравнительный анализ стандартных методов ускоренных коррозионных испытаний, на основании которого удалось сформулировать некоторые дополнения для Международной методики тестирования устойчивости металлических материалов к коррозии ASTM B117[7], представлен в работах ученых, среди которых: отсутствие циклов высыхания (в реальных условиях техника подвергается периодическому высыханию под солнцем) постоянная температура порядка 35 ± 2 °C, не отражающая суточных колебаний в полевых условиях игнорирование механических нагрузок и вибраций, присутствующих при эксплуатации сельскохозяйственной техники [32; 40; 41]. Данные выводы также нашли подтверждение в исследованиях [12; 36; 41], в которых представлен сравнительный анализ динамики развития коррозионных очагов с учетом факторов, характеризующих климатические зоны. Установлено, что стандартные испытания в солевом тумане минимизируют реальную скорость коррозии на 25–30 % для умеренного климата и порядка 40–45 % для приморских регионов. Практический интерес представляют работы отечественных

[5] Барчукова А. С. Повышение сохраняемости сельскохозяйственной техники применением хелатного комплекса меди : дис. ... канд. техн. наук. М., 2025. 152 с.

[6] Способы и инструменты повышения эксплуатационной эффективности узлов и агрегатов сельскохозяйственной техники : моногр.

[7] Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus. [Электронный ресурс]. URL: https://store.astm.org/b0117-19.html (дата обращения: 25.02.2025).

ученых по изучению влияния агрохимикатов на коррозионные процессы[8] [43]. Учеными установлено, что современные фосфорсодержащие удобрения создают локальные питтинговые зоны на поверхности металла, что приводит к развитию кислотной коррозии с характерной скоростью порядка 1,2–1,8 мм/год. Одним из трендов в области ресурсных испытаний являются исследования [12; 27; 36], связанные с изучением коррозии композитных материалов [40; 41; 43]. Обобщив представленные авторами [41; 44; 45] тезисы, можно сделать вывод, что полимерные покрытия на основе эпоксидных смол с наночастицами TiO_2 или аналогичных по физико-механическим свойствам пленок способны увеличить стойкость в условиях воздействия солевого тумана по сравнению с традиционными лакокрасочными покрытиями до 40 %.

Несмотря на многообразие рассматриваемых исследователями вопросов, удалось выделить те, которым уделено недостаточно внимания. Например, отсутствуют рекомендации по выбору того или иного закона распределения параметров, характеризующих распространение очагов коррозии в условиях эксплуатации сельскохозяйственных машин с агрессивными средами. Данный фактор в значительной степени затрудняет нормировку данных при разработке интеллектуализированных цифровых решений, позволяющих осуществлять ускоренные ресурсные испытания, в том числе и с использованием цифровых двойников [46–48]. Согласно данным[9] ежегодные потери от коррозии в сельхозтехнике составляют порядка 12–15 % от стоимости новой техники в умеренном климате, 20–25 % в приморских и засушливых регионах, до 40 % при эксплуатации в условиях интенсивного применения удобрений. Таким образом, необходимость разработки методики статистического анализа закономерностей распространения коррозии является обоснованной. Создание подобного инструментария позволит повысить точность прогнозирования износа, а также шаблонизировать адаптацию антикоррозионных мер к реальным условиям эксплуатации, повысив при этом долговечность сельскохозяйственной техники.

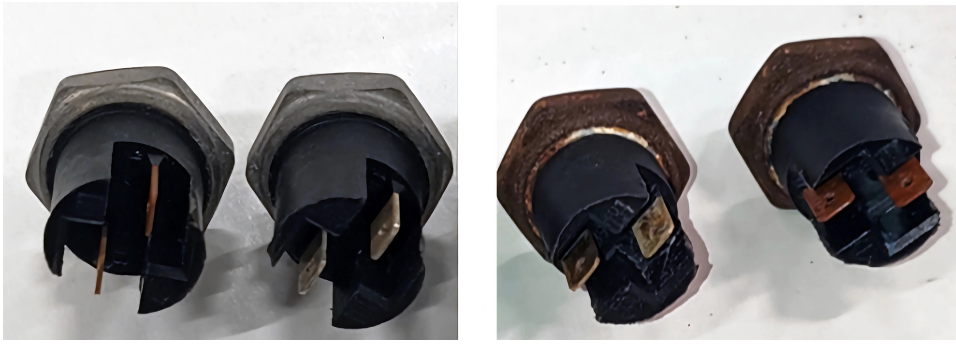
МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве объекта исследования, предназначенного для изучения воздействия солевого тумана на коррозию узлов сельскохозяйственной техники, были выбраны выключатели света заднего хода. Такой выбор обусловлен широкой распространенностью этих компонентов в различных марках и моделях комбайнов, выпускаемых разными производителями. Выключатели света заднего хода применяются не только в комбайностроении, но и в тракторной, автомобильной, судостроительной и других отраслях промышленности. Согласно информации, предоставленной производителем машиностроительной продукции, основной причиной отказа

[8] Павлов В. С., Смирнов А. Г., Гордеев А. А. Коррозионная стойкость конструкционных материалов в контакте с комплексными удобрениями // Научно-образовательные и прикладные аспекты производства и переработки сельскохозяйственной продукции : сб. материалов V Междунар. науч.-практ. конф. (15 ноября 2021 г., г. Чебоксары). Чебоксары : Чувашский государственный аграрный университет, 2021. С. 619–624. https://elibrary.ru/uaoufl

[9] Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций. Статистика [Электронный ресурс] : сайт. URL: https://www.fao.org/statistics/ru/ (дата обращения: 25.02.2025).

выключателей света заднего хода является окисление контактов и залипание подвижных элементов. В рамках данного исследования рассматривались два типа выключателей, различающихся материалом контактных элементов. Первый тип (М) был оснащен медными контактами, которые демонстрируют достаточно высокую электропроводность, однако подвержены окислению с образованием различных химических отложений, особенно при эксплуатации в условиях повышенной влажности. Такие выключатели рекомендуются для применения в стабильных сухих условиях, например, в сельскохозяйственной технике, работающей в засушливых регионах [19; 20]. Второй тип выключателей (МС) имел посеребренные медные контакты, сочетающие преимущества меди с дополнительными защитными свойствами серебряного покрытия, благодаря которому достигается повышение электропроводности и коррозионной стойкости контактной группы при эксплуатации в агрессивных средах. Несмотря на увеличенную стоимость, данный тип выключателей является предпочтительным выбором для техники, эксплуатирующейся в условиях повышенной влажности, химического загрязнения или значительных температурных колебаний, включая зерноуборочные комбайны и морское оборудование [19; 20; 42]. Преждевременный выход из строя данного узла, по данным производителя, обусловлен несоответствием фактического срока службы паспортным характеристикам изделия. Объем экспериментальной выборки насчитывал по 50 образцов каждой категории. Общий вид выключателей заднего хода *С*-исполнения с медными клеммами представлен на рисунке 1 до воздействия и после.



a) b)

Р и с. 1. Общий вид выключателей заднего хода зерноуборочного комбайна *С*-исполнения с медными клеммами:
a) до; b) после воздействия солевым туманом

F i g. 1. General view of the reversing switches of the combine harvester *C*-versions with copper terminals:
a) before; b) after exposure to salt spray

Источник: фотографии сделаны А. А. Щербаковым во время исследования ресурса выключателей заднего хода зерноуборочного комбайна РСМ в центре ресурсных испытаний Института перспективного машиностроения Донского государственного технического университета в 2024 г.

Source: the photographs were taken by A. A. Shcherbakov during a study of the reverse (backup) switches durability on the RSM grain harvester at the Resource Testing Center of the Institute of Advanced Engineering of Don State Technical University, 2024.

Свойства и состав исследуемых выключателей представлены в таблице 1.

Таблица 1
Table 1

Компонентный состав исследуемых выключателей заднего хода
The component composition of the studied reversing switches

№	Компонент выключателя заднего хода / Reverse switch component	Материал / Material	Функционал компонента / Component functionality
1	Корпус выключателя / Switch housing	Полиформальдегидное основание, АВС-пластик / Polyformaldehyde base, ABC-plastic	Защищает внутренние элементы от пыли, влаги и механических повреждений / Protects internal components from dust, moisture and mechanical damage
2	Контактная группа / Contact group	Бронза / Bronze	Замыкает или размыкает электрическую цепь при включении заднего хода / Closes or opens the electrical circuit when reverse gear is engaged
3	Пружинный механизм / Spring mechanism	Сталь 40Х / Steel 40Х	Обеспечивает возврат контактов в исходное положение / Ensures the contacts return to their original position
4	Толкатель или шток / Pusher or rod	Сталь 40Х / Steel 40Х	Механический элемент, срабатываемый при включении передачи заднего хода / Mechanical element triggered when reverse gear is engaged
5	Клеммы / Terminals	Медь или посеребренная медь / Copper or silver-plated copper	Подключение к бортовой системе электропитания / Connection to the on-board power supply system

Согласно ГОСТ 9.908-85[10] степень поражения поверхности металла коррозией пятнами (G) вычислялась по формуле:

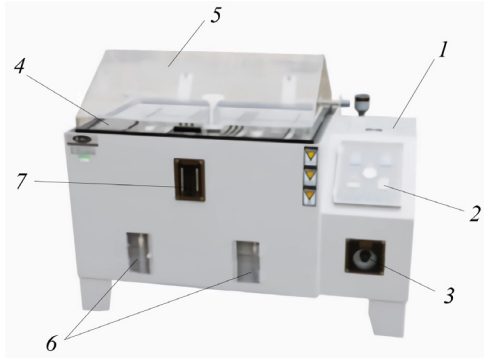
$$G = \frac{\sum_{i=1}^{n} S_i}{S} \cdot 100, \ \%, \qquad (1)$$

где S_i – площадь i-го пятна, м^2; S – площадь поверхности образца, м^2; n – количество пятен, шт.

Для решения поставленной задачи были проведены ресурсные испытания в специализированной камере, моделирующей неблагоприятные условия. Устойчивость к воздействию солевого тумана была проведена в камере соляного тумана (Corrosion Test Chamber SH-90), представленной на рисунке 2. Более подробно с характеристиками испытательного стенда можно познакомиться на сайте изготовителя[11].

[10] ГОСТ 9.908–85. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости [Электронный ресурс]. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200007383 (дата обращения: 25.02.2025).

[11] Salt Spray Test Cabinet [Электронный ресурс]. URL: https://clck.ru/3PDZPx (дата обращения: 25.02.2025).



Р и с. 2. Общий вид камеры солевого тумана Corrosion Test Chamber SH-90:
1 – емкость входного раствора; *2* – панель управления; *3* – регулировочный клапан; *4* – испытательная камера; *5* – крышка; *6* – мерные цилиндры; *7* – датчики температуры и влажности

F i g. 2. General view of salt spray chamber "Corrosion Test Chamber SH-90":
1 – inlet solution container; *2* – control panel; *3* – control valve; *4* – test chamber; *5* – lid; *6* – measuring cylinders; *7* – temperature and humidity sensors

Источник: здесь и далее рисунки составлены авторами статьи.

Source: hereinafter in this article the diagrams are compiled by the authors of the article.

Представленный на рисунке 2 испытательный стенд состоит из емкости ввода испытательного раствора *1*, куда загружается испытательный раствор, в котором автоматически происходит распределение солевого раствора в отверстии для предварительного нагрева. С фронтальной стороны находится панель управления *2* с сигнализатором, сообщающим об ошибке или завершении испытания, и регулировочный клапан *3* необходимого давления (по умолчанию 1,00 ± 0,01 кгс/см^2). Кроме основной испытательной камеры *4*, находящейся под крышкой *5*, также имеется отверстие корпуса управления, датчики температуры и влажности в камере *7* и мерные цилиндры *6* для определения объема раствора в камере.

Параметры, при которых произведены испытания по ГОСТ Р 52230 и ГОСТ 9.302[12], обозначены в таблице 2.

Таблица 2
Table 2

Параметры испытаний в камере соляного тумана
Test parameters in the salt spray chamber

№	Параметр, размерность / Parameter, dimension	Значение / Meaning
1	pH раствора / Solution pH	6,5
2	Температура, °С / Temperature, °С	30
3	Плотность соляного раствора, г/л / Density of brine solution, g/l	32
4	Продолжительность экспозиции, ч / Exposure duration, h	200
5	Интервал контроля, ч / Control interval, h	48

[12] ГОСТ Р 52230-2004. Электрооборудование автотракторное. Общие технические условия. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200035698 (дата обращения: 21.10.2021); ГОСТ 9.302-88. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Методы контроля. URL: https://internet-law.ru/gosts/gost/19600 (дата обращения: 21.10.2021).

Экспериментальные исследования проводились с учетом требований ГОСТ Р 52230 и ГОСТ 9.302[13] с использованием методик планирования эксперимента. Испытания проводились в течение 200 ч с промежуточными осмотрами через каждые 48 ч. На протяжении испытания на воздействие солевого тумана при визуальном осмотре разрушения пластика не выявлено, при этом защитные металлические покрытия корродировали. Работоспособность образцов группы *C*-выключателей с медными и посеребренными клеммами сохранилась. Результат проведения испытаний выключателей положительный.

В процессе проведения экспериментальных исследований определялся процент поражения объекта исследования коррозийными пятнами каждые 48 ч. После чего для каждой из интервальных категорий выборок определялись их статистические характеристики, на основании которых строились гипотезы относительно соответствия закону распределения Вейбулла. Ниже представим используемый математический аппарат.

Среднее арифметическое значение выборки определялось по формуле:

$$\overline{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i, \tag{2}$$

где n – число наблюдений выборки; x_i – отдельный элемент выборки.

Медиана выборки параметра, характеризующего процент коррозионного повреждения выключателей, определялась по следующей формуле:

$$M_e = \frac{x\left(\frac{n}{2}\right) + x\left(\frac{n}{2}+1\right)}{2}. \tag{3}$$

Дисперсия выборки:

$$S^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \overline{x}\right)^2. \tag{4}$$

Стандартное отклонение:

$$s = \sqrt{S^2}. \tag{5}$$

Асимметрия выборки:

$$A = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{x_i - \overline{x}}{s}\right)^3. \tag{6}$$

Эксцесс выборки:

$$K = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{x_i - \overline{x}}{s}\right)^4 - 3. \tag{7}$$

Размах выборки:

$$R = x_{\max} - x_{\min}. \tag{8}$$

[13] ГОСТ Р 52230-2004. Электрооборудование автотракторное. Общие технические условия; ГОСТ 9.302-88. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Методы контроля.

Число интервалов выборки согласно правилу Стерджеса:

$$k = 1 + \log_2 n. \quad (9)$$

Длина интервала:

$$h = \frac{R}{k}, \quad (10)$$

где k — число интервалов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

После проведения экспериментальных исследований получения соответствующих выборок, характеризующих распределение коррозии по образцам с интервалом контролирования 48 ч, была получена следующая зависимость (рис. 3), отражающая степень поражения образца (выключателей заднего хода коррозионными пятнами (%) в зависимости от продолжительности экспозиции до 200 ч). На протяжении испытаний при визуальном осмотре на группах *С*-выключателей и *Н*-выключателей разрушения пластика не выявлено. Защитные металлические покрытия корродировали только на *С*-выключателях. Установлено, что работоспособность образцов группы *Н*-выключателей с медными и посеребренными клеммами сохранилась; для выключателей *С*-исполнения с медными клеммами отклонение по работоспособности после 144 ч испытаний. Работоспособность образцов группы *С*-выключателей с медными и посеребренными клеммами после 240 ч испытаний не сохранилась. На основании программы и методики испытаний были выявлены критерии прохождения испытаний, обобщенные в таблице 3.

Таблица 3
Table 3

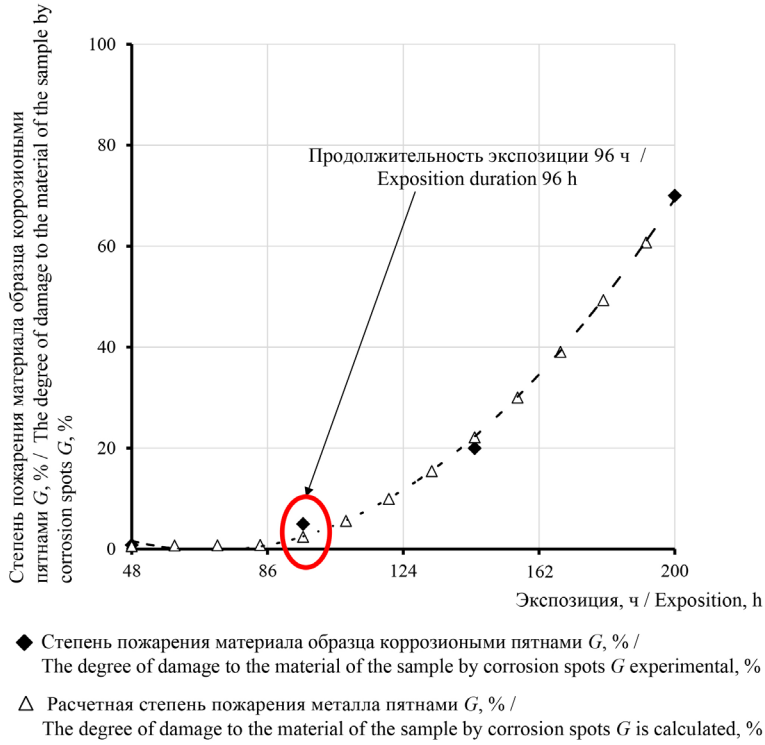
Работоспособность выключателей после прохождения испытаний
Performance of circuit breakers after testing

№	Исполнение образца / Sample execution	Обозначение образца / Sample Description	Площадь коррозии, % / Corrosion area, %	Показатель работоспособности / Performance indicator		Время отклонения по работоспособности / Performance deviation time
				Проведение электрического сигнала / Conducting an electrical signal	Подвижность кнопки-шарика / Ball button mobility	
1	*С*-выключатель / *С*-switch	М	85	+	–	144
2		МС	85	+	–	240
3	*Н*-выключатель / *Н*-switch	М	5	+	+	*
4		МС	8	+	+	*

Примечание: * – время отклонения по работоспособности *Н*-выключателей не было зафиксировано, так как после обозначенных часов (240 ч) не было выявлено технических неисправностей.

Note: * – the time of deviation in the operability of the *H*-switches was not recorded, since no technical malfunctions were detected after the indicated hours (240 h).

Зависимость поражения образцов выключателей заднего хода коррозионными пятнами представлена на рисунке 3. На координатной плоскости присутствуют экспериментальные и расчетные данные (%) коррозионных повреждений.



Р и с. 3. График изменения поражения образцов
F i g. 3. Graph of changes in the lesions of the samples

Формализовать зависимость, представленную на рисунке 3, можно с использованием квадратичной регрессионной модели:

$$G = 19,717 + 0,004 \cdot t^2 - 0,573 \cdot t. \quad (11)$$

где t – продолжительность экспозиции образцов в камере солевого тумана, ч.

Модель (11) статистически значима и формализует результаты экспериментальных исследований с коэффициентом детерминации $r^2 = 0,99$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$. Проанализировав результаты экспериментальных исследований, представленные на рисунке 3, можно определить, что начиная с 96 ч наблюдается значительный рост процента коррозионных пятен на поверхностях выключателей заднего хода, причина данного явления состоит в следующем. На начальных стадиях воздействия солевого тумана возможно наличие оксидной пленки или антикоррозионного покрытия, которое частично защищает металл и к 96 ч разрушается или перестает эффективно препятствовать коррозии. Следующим эффектом, позволяющим объяснить данную зависимость, является то, что в условиях солевого

тумана присутствует возникновение очагов питтинговой коррозии, обладающих кумулятивным эффектом. Образование коррозионных питтингов также способствует возникновению капиллярных эффектов, результатом которых является образование на поверхности металла накоплений влаги и солевых отложений, создающих микрогальванические пары, значительно ускоряющие коррозию. Соответственно, в качестве начальной точки прогнозирования распространения коррозии на образцах закону распределения Вейбулла примем продолжительность экспозиции в солевом тумане 96 ч. Распределение Вейбулла, задаваемое двумя функциями:

$$f(x)=\frac{\beta}{\lambda}\left(\frac{x}{\lambda}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^{\beta}}, \quad x\geq 0, \quad \beta, \quad \lambda>0, \tag{12}$$

где β — коэффициент формы; λ — параметр масштаба распределения.

Функция риска, характеризующая интенсивность отказов по Вейбуллу:

$$h(x)=\frac{f(x)}{S(x)}=\frac{\beta}{\lambda}\left(\frac{x}{\lambda}\right)^{\beta-1}. \tag{13}$$

Функция риска $h(x)$, она же интенсивность отказов технической системы, характеризует вероятность того, что объект выйдет из строя в момент x при условии, что он функционировал до этого времени. Для распределения Вейбулла она имеет вид $\beta < 1$ – убывающий риск (износостойкие системы); $\beta = 1$ – постоянный риск (экспоненциальное распределение, случайные отказы); $\beta > 1$ – возрастающий риск (износ, усталость материалов). Используя формулу (1), определим процент коррозии каждого образца, получив таким образом выборку объемом 50 наблюдений. Коэффициент формы $\beta = 5{,}9$; параметр масштаба распределения $\lambda = 5{,}6$. По формулам (2)–(10) рассчитаем наиболее представительные статистические характеристики полученной выборки, результаты расчетов представлены в таблице 4.

Таблица 4
Table 4

Статистические параметры и характеристики выборки
Statistical parameters and characteristics of the sample

№	Параметр / Parameter	Значение / Value	Характеристики выборки / Characteristics of the sample	Значение / Meaning
1	Среднее арифметическое $\bar{x}$ / Arithmetic mean $\bar{x}$	5,190	Объем n / Volume n	50,00
2	Медиана M_e / Median M_e	5,150	Минимальное значение / Minimum value	4,35
3	Стандартное отклонение s / Standard deviation s	0,530	Максимальное значение / Maximum value	6,94
4	Асимметрия A / Asymmetry A	–0,050	Размах R / Swing R	1,59
5	Эксцесс K / Excess K	–0,120	Длина интервала h / Interval length h	0,22
6	Дисперсия S^2 / Dispersion S^2	0,284	Число интервалов k / Number of intervals k	7,00

Анализ статистических параметров выборки подтверждает ее соответствие закону распределения Вейбулла. Близкие значения среднего арифметического ($\bar{x}$ = 5,19) и медианы (M_e = 5,15) указывают на слабую асимметрию, что согласуется с низким значением коэффициента асимметрии (A = −0,05). Размах выборки (R = 1,59) и стандартное отклонение (s = 0,53) свидетельствуют о сравнительно небольшом разбросе значений, характерном для распределения Вейбулла при умеренных значениях параметра формы. Значение эксцесса (K = −0,12) указывает на слабо выраженные хвосты распределения, что соответствует форме плотности вероятности Вейбулла при параметре формы $k > 3$. Длина интервала (h = 0,22) и число интервалов (k = 7) обеспечивают корректное разбиение данных, что важно для оценки соответствия эмпирического распределения теоретическому. Таким образом, совокупность параметров выборки подтверждает гипотезу о ее соответствии распределению Вейбулла.

Для строгой проверки гипотезы о соответствии выборки распределению Вейбулла необходимо построить гистограмму и эмпирическую функцию распределения, а также рассчитать функции риска (13). Как показал анализ информационных источников в качестве критерия достоверности соответствия плотности вероятностей распределения коррозии образцов при экспозиции 96 ч в камере солевого тумана закону распределения Вейбулла необходимо принять критерий согласия Колмогорова-Смирнова, χ^2. Критерий Колмогорова-Смирнова проверяет, насколько эмпирическая функция распределения выборки отличается от предполагаемой теоретической функции распределения:

$$\chi^2_{est} = \sum_{i=1}^{k} \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}, \tag{14}$$

где O_i – наблюдаемая частота в i-м интервале; E_i – ожидаемая частота в i-м интервале.

Значение χ^2_{est} сравнивается с критическим значением распределения χ^2_{crit} при заданном уровне значимости α = 0,05 и числе степеней свободы:

$$v = k - m - 1, \tag{15}$$

где m – число оцениваемых параметров распределения.

Если выполняется условие $\chi^2_{est} < \chi^2_{crit}$, гипотеза о соответствии выборки заданному распределению принимается. В таблице 5 представлены статистические характеристики сопоставление эмпирических и теоретических частот распределения Вейбулла.

На рисунке 4 представлено распределение плотности вероятностей эмпирических и теоретических частот выборки в соответствии с законом Вейбулла.

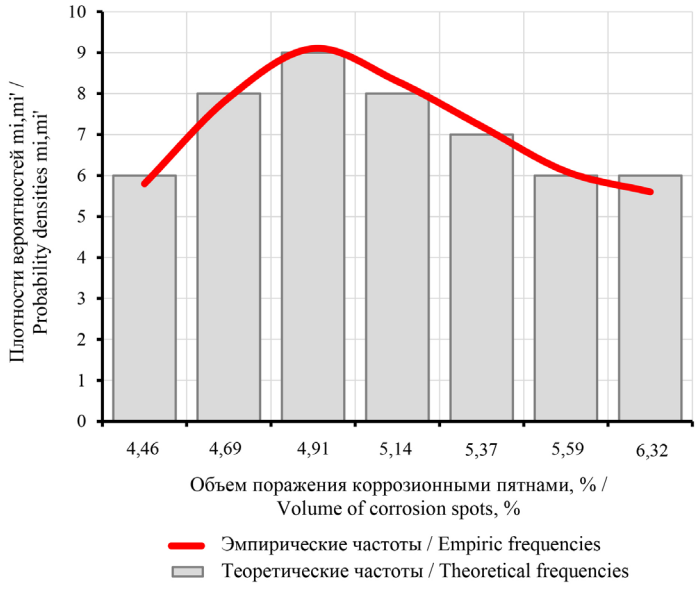
Сопоставив данные (рис. 4, табл. 4), показывающие распределение эмпирических и теоретических частот, можно сделать вывод о достаточной степени соответствия выборки закону распределения Вейбулла. Различия между эмпирическими и теоретическими частотами в каждом интервале незначительны, что подтверждает согласованность данных с моделью. Максимальное отклонение составляет не более 0,2…0,3 единицы, что находится в пределах допустимых статистических флуктуаций. Суммарные частоты совпадают, что дополнительно свидетельствует

об адекватности примененной модели распределения. Таким образом, результаты анализа подтверждают гипотезу о соответствии выборки закону распределения Вейбулла. Используя данные экспериментальных исследований, представленные в таблице 4 результаты, осуществив расчет по формуле (14), были определены $\chi^2_{est} = 0,057$ и $\chi^2_{crit} = 9,49$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$, что подтверждает гипотезу о соответствии выборки, характеризующей распространение коррозии на выключателях заднего хода закону распределения Вейбулла при экспозиции в камере солевого тумана продолжительностью 96 ч.

Таблица 5
Table 5

Сопоставление эмпирических и теоретических частот распределения Вейбулла
Comparison of empirical and theoretical frequencies of the Weibull distribution

№	Границы интервалов / Interval boundaries			Эмпирическая частота / Empirical frequency	Теоретические частоты / Theoretical frequencies
	Нижняя / Lower	Верхняя / Upper	Средняя / Medium		
1	4,350	4,576	4,350	6	5,8
2	4,576	4,801	4,576	8	7,9
3	4,801	5,027	4,801	9	9,1
4	5,027	5,252	5,027	8	8,3
5	5,252	5,478	5,252	7	7,2
6	5,478	5,704	5,478	6	6,1
7	5,704	6,940	5,704	6	5,6
Сумма / Amount				50	50,0



Р и с. 4. Распределение плотности вероятностей эмпирических и теоретических частот выборки в соответствии с законом Вейбулла

F i g. 4. Probability density distribution of empirical and theoretical sampling frequencies according to the Weibull law

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены экспериментальные исследования выключателей заднего хода в условиях воздействия солевого тумана, характерного для агрессивных условий эксплуатации сельскохозяйственной техники в полевых условиях. Спецификой эксплуатации сельскохозяйственных машин в полевых условиях является значительное число факторов, способствующих развитию коррозии и, как следствие, преждевременным отказам рабочих органов и компонентов, приводящим к дополнительным издержкам.

В качестве ключевых показателей коррозионной стойкости использовались средний объем коррозии после воздействия солевого тумана и изменение контактного сопротивления. Значение параметра формы ($\beta = 5{,}9$) указывает на предсказуемый механизм износа с четко выраженной критической фазой, наступающей после 80 ч испытаний (мода распределения). Вероятность отказа в первые 48 ч минимальна (<1 %), что подтверждает достаточную коррозионную стойкость выключателей в начальный период эксплуатации. Слабая асимметрия $A = -0{,}05$ подтверждает стабильность процесса без внезапных отказов.

Статистический анализ достоверности соответствия экспериментально полученной выборки по критерию Колмогорова-Смирнова (χ^2-критерий = 0,057 при критическом значении 9,49) подтвердил высокую степень соответствия экспериментальных данных закону распределения Вейбулла. Экспериментально выявлены критические временные интервалы начала активной коррозии 80...100 ч, сохранение работоспособности 95 % образцов до 96 ч. Полученные параметры распределения позволяют прогнозировать ресурс узлов, оптимизировать интервалы технического обслуживания, обоснованно выбирать материалы и защитные покрытия.

Полученные результаты представляют исходные данные для создания цифровых двойников рабочих органов и других значимых компонентов и узлов сельхозтехники, которые позволят моделировать процессы коррозионного старения в виртуальной среде, оптимизировать конструктивные решения на этапе проектирования, проводить виртуальные испытания различных защитных покрытий и материалов. Перечисленное открывает перспективы для создания адаптивных систем управления сервисным обслуживанием с автоматической корректировкой межсервисных интервалов в зависимости от фактической агрессивности среды и персонализированными графиками технического обслуживания для каждой единицы техники, а также позволяет минимизировать простои за счет точного прогнозирования их ресурса с учетом специфики среды эксплуатации.

Направлением дальнейших исследований является разработка методов адаптации параметров распределения в реальном времени на основе данных с датчиков коррозионного мониторинга в системы ИИ, что позволит создать импортозамещенные самообучающиеся средства прогнозирования ресурса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Катаев Ю.В., Загоруйко М.Г., Тишанинов И.А., Градов Е.А. Прогнозирование отказов в двигателях сельскохозяйственной техники с применением цифровых технологий. *Аграрный научный журнал.* 2022;(2):79–82. https://doi.org/10.28983/asj.y2022i2pp79-82

2. Гайдар С.М., Мирзаев Р.Р., Пикина А.М., Балькова Т.И. Разработка математической модели определения эффективности сельскохозяйственной техники на отдельных уровнях многоуровневой системы оценки качества. *Агроинженерия.* 2023;25(5):46–51. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-5-46-51
3. Ерохин М.Н., Дорохов А.С., Катаев Ю.В. Интеллектуальная система диагностирования параметров технического состояния сельскохозяйственной техники. *Агроинженерия.* 2021;(2):45–50. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-2-45-50
4. Зайберт А.В. Тенденции развития рынка сельскохозяйственной техники в России. *Вестник молодежной науки Алтайского государственного аграрного университета.* 2024;(2):80–83. https://elibrary.ru/mqvqho
5. Чавыкин Ю.И. Формирование автоматизированных интерактивных ресурсов сельхозмашин и оборудования, зарубежного опыта их использования и технического обслуживания. *Техника и оборудование для села.* 2023;(11):18–21. https://doi.org/10.33267/2072-9642-2023-11-18-21
6. Лукиенко Л.В. Анализ отказов эксплуатируемой сельскохозяйственной техники российского производства. *Агропродовольственная экономика.* 2024;(5):7–11. http://apej.ru/article/01-05-24
7. Герасимов В.С., Игнатов В.И., Буряков С.А., Мишина З.Н. Анализ состояния и направления развития сервисно-технологических услуг по поддержанию ресурса сельскохозяйственной техники в АПК. *Техника и оборудование для села.* 2020;(2):35–39. https://doi.org/10.33267/2072-9642-2020-2-35-39
8. Шуханов С.Н., Кузьмин А.В., Болоев П.А. Надежность работы машинно-тракторного агрегата. *Инженерные технологии и системы.* 2020;30(1):8–20. https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202001.008-020
9. Комаров В.А., Курашкин М.И. Исследование работоспособности зерноуборочных комбайнов в гарантийный период. *Инженерные технологии и системы.* 2021;(2):188–206. https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202102.188-206
10. Голубев И.Г., Апатенко А.С., Севрюгина Н.С., Быков В.В., Голубев М.И. Перспективные направления использования аддитивных технологий в ремонтном производстве. *Техника и оборудование для села.* 2023;(6):35–38. https://doi.org/10.33267/2072-9642-2023-6-35-38
11. Сенин П.В., Чаткин М.Н., Кильмяшкин Е.А. Аддитивные технологии для производства и ремонта сельскохозяйственной техники. *Инженерные технологии и системы.* 2024;34(4):584–596. https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.584-596
12. Лобачевский Я.П., Миронов Д.А., Миронова А.В. Основные направления повышения ресурса быстроизнашиваемых рабочих органов сельскохозяйственных машин. *Сельскохозяйственные машины и технологии.* 2023;17(1):41–50. https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-1-41-50
13. Трубицын Н.В., Таркивский В.Е., Подольская Е.Е. Измерительная информационная система для полевых испытаний сельскохозяйственной техники. *Техника и оборудование для села.* 2023:(8):18–20. https://doi.org/10.33267/2072-9642-2023-8-18-20
14. Никитченко С.Л., Капкаев А.А., Юхнов В.И., Муконина М.И. Управление жизненным циклом сельскохозяйственной техники на этапе эксплуатации в условиях цифровизации производства. *Аграрный научный журнал.* 2023;(10):194–204. https://doi.org/10.28983/asj.y2023i10pp194-204
15. Саяпин А.С., Петрищев Н.А., Пестряков Е.В. Совершенствование управления техническим состоянием машин за счет использования цифровых средств мониторинга. *Технический сервис машин.* 2023;61(4):10–17. https://doi.org/10.22314/2618-8287-2023-61-4-10-17
16. Голубев И.Г., Быков В.В., Голубев М.И., Апатенко А.С., Севрюгина Н.С. Перспективные направления цифровизации в сфере технического облуживания и ремонта сельскохозяйственной техники. *Технический сервис машин.* 2023;61(4):18–25. https://doi.org/10.22314/2618-8287-2023-61-4-18-25
17. Основин В., Клавсуть П., Основина Л., Основин С. Информационное обеспечение в системе технического обслуживания и ремонта кормоуборочных комбайнов. *Аграрная экономика.* 2023;(3):74–82. https://doi.org/10.29235/1818-9806-2023-3-74-82

18. Родионов Ю.В., Данилин С.И., Ломовских А.Е., Север А.В., Киселев М.Г., Рыбин Г.В. Способ повышения технико-эксплуатационных свойств образцов сельскохозяйственной техники. *Наука в центральной России.* 2024;(6):19–33. https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-6-19-33
19. Малышев Е.Н., Лошкарева Е.А., Зенкин В.Н. О статистической устойчивости параметров распределения Вейбулла в практическом описании стойкости металлорежущих инструментов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение.* 2024;(12):44–51. URL: https://izvuzmash.bmstu.ru/articles/2301/2301.pdf (дата обращения: 10.06.2025).
20. Wang J., Yin H. Failure Rate Prediction Model of Substation Equipment Based on Weibull Distribution and Time Series Analysis. *IEEE Access.* 2019;7:85298–85309. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2926159
21. Ramos P.L., Nascimento D.C., Cocolo C. Nicola M.J., Carlos A., Ribeiro L.G., et al. Reliability-Centered Maintenance: Analyzing Failure in Harvest Sugarcane Machine Using Some Generalizations of the Weibull Distribution. *Modelling and Simulation in Engineering*. 2018;(1):241856. https://doi.org/10.1155/2018/1241856
22. Verma A., Narula A., Katyal A., Yadav S.K., Anand P., Jahan A. Failure Rate Prediction of Equipment: Can Weibull Distribution be Applied to Automated Hematology Analyzers? *Clinical Chemistry and Laboratory Medicine (CCLM)*. 2018;56(12):2067–2071. https://doi.org/10.1515/cclm-2018-0569
23. Чиганова Н. М. Приближенная оценка надежности изделий при Вейбулловском распределении отказов. *Научно-технический вестник Поволжья.* 2024;(3):137–140. URL: file:///C:/Users/User/Downloads/NTVP_3_2024.pdf (дата обращения: 10.06.2025).
24. Подольская Е.Е., Таркивский В.Е., Свиридова С.А., Иванов А.Б. Нормативно-методическое обеспечение испытаний сельскохозяйственной техники. *Техника и оборудование для села.* 2022;(5):18–21. https://doi.org/10.33267/2072-9642-2022-5-18-20
25. Миронов Д.А. Эксплуатационно-ресурсные испытания импортозамещающих рабочих органов комбинированного агрегата. *Техника и оборудование для села.* 2022;(6):34–37. https://doi.org/10.33267/2072-9642-2022-6-34-37
26. Басинюк В.Л., Волкотруб Р.Е., Лобкова М.П., Глазунова А.А. Ускоренные испытания и экспресс-анализ служебных свойств конструкционных материалов. *Актуальные вопросы машиноведения.* 2024;13: 119–122. https://elibrary.ru/nslrji
27. Балкаров Р.А., Ашабоков Х.Х. Сохраняемость и защита от коррозии сельскохозяйственной техники в условиях КБР. *Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В.М. Кокова.* 2024;(1):88–98. https://doi.org/10.55196/2411-3492-2024-1-43-88-98
28. Бадалян В.Г., Вопилкин А.Х. Применение нейронных сетей в ультразвуковом неразрушающем контроле (обзор). *Контроль. Диагностика.* 2022;(5):12–25. https://doi.org/10.14489/td.2022.05.pp.012-025
29. Долматов Д.О. Применение искусственных нейронных сетей для решения задач акустического неразрушающего контроля (обзор). *Контроль. Диагностика.* 2023;(11):44–50. https://doi.org/10.14489/td.2023.11.pp.044-050
30. Pourhashem S., Saba F., Duan J., Rashidi A., Guan F., Nezhad E.G. Polymer/Inorganic Nanocomposite Coatings with Superior Corrosion Protection Performance: A Review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2020;88:29–57 https://doi.org/10.1016/j.jiec.2020.04.029
31. Purcell W., Neubauer T. Digital Twins in Agriculture: A State-of-the-Art Review. *Smart Agricultural Technology*. 2023;3:100094. https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100094
32. Sun R., Zeng Z., Zhu Y. Case Study on the Failure of World Agricultural Machinery IPO. *Highlights in Business, Economics and Management*. 2024;37:55–63. https://doi.org/10.54097/nxegwt47
33. Hamid Z.A. Reducing the Wear and Corrosion of the Agricultural Mower Steel Knives by Electrodeposition Nanocomposite Coatings – Review. *Egyptian Journal of Chemistry*. 2020;63(3):3075–3095. https://doi.org/10.21608/EJCHEM.2020.28677.2615

34. Li X., Li Ya., Li F., Huang Z., Chen H. Failure Analysis and Experimental Study on Bolted Composite Joints Based on Continuum Damage Mechanics. *Composite Structures.* 2023;303:116274. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116274
35. Жиздюк А.А., Буйлов В.Н., Чумакова С.В., Ахилбеков М.Н. Применение цифровых двойников технологических машин в АПК при эксплуатации и сервисном обслуживании. *Агроинженерия.* 2025;27(1):20–25. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-20-25
36. Liu H., Zhang L., Zhao B., Tang J., Luo J., Wang Sh. Research on Emergency Scheduling Based on Improved Genetic Algorithm in Harvester Failure Scenarios. *Frontiers in Plant Science.* 2024;15:1413595. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1413595
37. Hwang In.S., Kim J.H., Im W.T., Jeung H.H., Nam Ju.S., Shin Ch.S. Analyzing Safety Factors and Predicting Fatigue Life of Weak Points in an Electrically Driven, Multi-Purpose Cultivation Tractor. *Agriculture.* 2024;14(3):416. https://doi.org/10.3390/agriculture14030416
38. Zhang H., Chen Ya., Cong J., Liu Ju., Zhang Zh., Zhang X. Reliability Study of an Intelligent Profiling Progressive Automatic Glue Cutter Based on the Improved FMECA Method. *Agriculture.* 2023;13(8):1475. https://doi.org/10.3390/agriculture13081475
39. Gehling T., Schieppati Ja., Balasooriya W., Kerschbaumer R.Ch., Pinter G. Fatigue Behavior of Elastomeric Components: A Review of the Key Factors of Rubber Formulation, Manufacturing, and Service Conditions. *Polymer Reviews.* 2023;63(3):763–804. https://doi.org/10.1080/15583724.2023.2166955
40. Ушаков М.В., Кутепов С.Н., Калинин А.А., Гречишкина Е.А. Исследование коррозионной стойкости комбинированных металлизационно-лакокрасочных защитных покрытий. *Известия Тульского государственного университета.* 2023;(5):319–325. https://doi.org/10.24412/2071-6168-2023-5-319-320
41. Мозговой Н.И., Раченкова М.С. Повышение коррозионной стойкости ответственных деталей сельскохозяйственной техники методом оксикарбонитрации. *Агротехника и энергообеспечение.* 2022;(4):182–187. https://elibrary.ru/ocauqp
42. Дорохов А.С., Катаев Ю.В., Костомахин М.Н., Петрищев Н.А., Пестряков Е.В., Саяпин А.С. Управление техническим состоянием сельскохозяйственной техники с применением цифровых технологий. *Российская сельскохозяйственная наука.* 2024;(5):51–56. https://doi.org/10.31857/S2500262724050102
43. Карасева Т.Н. Оценка коррозионной активности минеральных удобрений. *Технологии и инновации.* 2022:179–181. https://elibrary.ru/dfpvnq
44. Das K. A Comparative Study of Exponential Distribution vs Weibull Distribution in Machine Reliability Analysis in a CMS Design. *Computers & Industrial Engineering.* 2008;54(1):12–33. https://doi.org/10.1016/j.cie.2007.06.030
45. Sizaya O.I., Kvashuk Yu.V., Korolyov O.O., Dmytriiev V.A., Pavlenko A.H., Savchenko O.M. Corrosion of Structural Steels under the Action of N, S-Containing Mineral Fertilizers. *Materials Science.* 2021;57:119–127. https://doi.org/10.1007/s11003-021-00522-5
46. Hozhimatov A. Analysis of Destruction and Protection of Details of Agricultural Machinery. *E3S Web of Conferences*. 2023;383:04064. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338304064
47. Al-Goul S.T., Abdel-Hamid S.M.S., Bassyouni M. Enhanced Corrosion Resistance of Mild Steel in Acidic Media Using PVA-Chitosan-Dopamine Composite Coatings. *ChemistrySelect*. 2024;9(30):202402161. https://doi.org/10.1002/slct.202402161
48. Popovych P.V., Slobodyan Z.B. Corrosion and Electrochemical Behaviors of 20 Steel and St.3 Steel in Ammonium Sulfate and Nitrophoska. *Materials Science*. 2014;49:819–826. https://doi.org/10.1007/s11003-014-9679-6

Об авторах:

Лимаренко Николай Владимирович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры приборостроения и биомедицинской инженерии, главный научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории PCM-Star института перспективного машиностроения Донского

государственного технического университета (344000, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3075-2572, Researcher ID: O-5342-2017, nlimarenko@donstu.ru

Савенков Дмитрий Николаевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры техники и технологий пищевых производств, заведующий научно-исследовательской лабораторией PCM-Star института перспективного машиностроения Донского государственного технического университета (344000, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4546-424X, savenkov-dstu@yandex.ru

Гладких Дмитрий Игоревич, аспирант кафедры металлорежущих станков и инструментов, научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории PCM-Star института перспективного машиностроения Донского государственного технического университета (344000, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2292-256X, Researcher ID: HDM-6104-2022, ya@dgladckih.ru

Щербаков Алексей Алексеевич, ассистент кафедры техники и технологии пищевых производств, научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории PCM-Star института перспективного машиностроения Донского государственного технического университета (344000, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6856-2219, Researcher ID: GQI-3325-2022, aatsherbakov@donstu.ru

Вклад авторов:

Н. В. Лимаренко – контроль, лидерство и наставничество в процессе планирования и проведения исследования; формулирование идеи исследования, целей и задач; создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования и полученных данных.

Д. Н. Савенков – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор данных; создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования и полученных данных.

Д. И. Гладких – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор данных; создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования и полученных данных.

А. А. Щербаков – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор данных; создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования и полученных данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила в редакцию 14.04.2025; поступила после рецензирования 22.04.2025;
принята к публикации 13.05.2025

REFERENCE

1. Kataev Yu.V., Zagoruiko M.G., Tishaninov I.A., Gradov E.A. Prediction of Failures in Agricultural Machinery Engines Using Digital Technologies. *Agrarian Scientifi Journal*. 2022;(2:)79–82. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.28983/asj.y2022i2PP79-82
2. Gaidar S.M., Mirzaev R.R., Pikina A.M., Balkova T.I. Developing a Mathematical Model for Determining the Efficiency of Agricultural Machinery at Separate Levels of a Multilevel Quality Assessment System. *Agricultural Engineering*. 2023;25(5):46–51. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.26897/26871149202354651

3. Erokhin M.N., Dorokhov A.S., Kataev Yu.V. Intelligent System for Diagnosing the Parameters of the Technical Condition of Tractors. *Agricultural Engineering*. 2021;(2):45–50. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-2-45-50
4. Zaybert A.V. Trends in the Development of the Agricultural Machinery Market in Russia. *Vestnik Molodezhnoj Nauki Altajskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta.* 2024;(2):80–83. (In Russ., abstract in Eng.) https://elibrary.ru/mqvqho
5. Chavykin Yu.I. Formation of Automated Interactive Informational Resources of Agricultural Machinery and Equipment, Foreign Experience of Their Use and Maintenance. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2023;(11):18–21. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.33267/2072-9642-2023-11-18-21
6. Lukienko L.V. Analysis of Failures of Russian-Made Agricultural Machinery in Operation. *Agro Production and Econimics Journal*. 2024;(5):7–11. (In Russ., abstract in Eng.) http://apej.ru/article/01-05-24
7. Gerasimov V.S., Ignatov V.I., Buryakov S.A., Mishina Z.N. Analysis of the Status and Areas of Development of Maintenance and Technological Services for Keeping the Lifetime of Agricultural Machinery in the Agricultural Sector. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2020;(2):35–39. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.33267/2072-9642-2020-2-35-39
8. Shukhanov S.N., Kuzmin A.V., Boloyev P.A. Reliability of Machine-Tractor Aggregates Operation. *Engineering Technologies and Systems*. 2020;30(1):8–20. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202001.008-020
9. Komarov V.A., Kurashkin M.I. Studying the Normal Operation of Grain Harvesters within the Warranty Period. *Engineering Technologies and Systems*. 2021;(2):188–206. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202102.188-206
10. Golubev I.G., Apatenko A.S., Sevryugina N.S., Bykov V.V., Golubev M.I. Promising Paths for the Use of Additive Technologies in the Repair Industry. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2023;(6):35–38. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.33267/2072-9642-2023-6-35-38
11. Senin P.V., Chatkin M.N., Kilmyashkin E.A. Additive Technologies for Production and Repair of Agricultural Equipment. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(4):584–596. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.584-596
12. Lobachevskiy Ya.P., Mironov D.A., Mironova A.V. Increasing The Operating Lifetime of Wearable Working Bodies of Agricultural Machines. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023;17(1):41–50. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/110.22314/2073-7599-2023-17-1-41-50
13. Trubitsyn N.V., Tarkivsky V.E., Podolskaya E.E. Measuring Information System for Field Tests of Agricultural Machinery. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2023;(8):18–20. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.33267/2072-9642-2023-8-18-20
14. Nikitchenko S.L., Kapkaev A.A., Yukhnov V.I., Mukonina M.I. Life Cycle Management of Agricultural Machinery at the Operational Stage in the Conditions of Digitalization of Production. *Agrarian Scientific Journal*. 2023;(10):194–204. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.28983/asj.y2023i10pp194-204
15. Sayapin A.S., Petrishchev N.A., Pestryakov E.V. The Need to Improve the Management of the Equipment Technical State through the Use of Digital Monitoring Tools. *Machinery Technical Service*. 2023;61(4):10–17. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.22314/2618-8287-2023-61-4-10-17
16. Golubev I.G., Bykov V.V., Golubev M.I., Apatenko A.S., Sevryugina N.S. Promising Areas of Digitalization in the Technical Maintenance and Repair of Agricultural Machinery. *Machinery Technical Service*. 2023;61(4):18–25. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.22314/2618-8287-2023-61-4-18-25
17. Osnovin V., Klavsut P., Osnovina L., Osnovin S. Information Support in the System of Maintenance and Repair of Forage Harvesters in Agriculture. *Agrarian Economics*. 2023;(3):74–82. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.29235/1818-9806-2023-3-74-82

18. Rodionov Yu.V., Danilin S.I., Lomovskikh A.E., Sever A.V., Kiselev M.G., Rybin G.V. Method of Increasing the Technical and Operational Properties of Agricultural Machinery Samples. *Science in the Central Russia*. 2024;(6):19–33. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.3587/2305-2538-2024-6-19-33
19. Malyshev E.N., Loshkareva E.A., Zenkin V.N. On Statistical Stability of the Weibull Distribution Parameters in Practical Description of the Metal-Cutting Tool Resistance. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2024;(12):44–51. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: https://izvuzmash.bmstu.ru/articles/2301/2301.pdf (accessed 10.06.2025).
20. Wang J., Yin H. Failure Rate Prediction Model of Substation Equipment Based on Weibull Distribution and Time Series Analysis. *IEEE Access*. 2019;7:85298–85309. https://doi.org/10.1109/access 2019.2926159
21. Ramos P.L., Nascimento D.C., Cocolo C. Nicola M.J., Carlos A., Ribeiro L.G., et al. Reliability-Centered Maintenance: Analyzing Failure in Harvest Sugarcane Machine Using Some Generalizations of the Weibull Distribution. Modelling and Simulation in Engineering. 2018;(1):241856. https://doi.org/10.1155/2018/1241856
22. Verma A., Narula A., Katyal A., Yadav S.K., Anand P., Jahan A. Failure Rate Prediction of Equipment: Can Weibull Distribution be Applied to Automated Hematology Analyzers? Clinical Chemistry and Laboratory Medicine (CCLM). 2018;56(12):2067–2071. https://doi.org/10.1515/cclm-2018-0569
23. Chiganova N.M. [A Close Assessment of the Reliability of Products at the Veibullovsky Distribution of Failures]. *Scientific and Technical Volga region Bulletin*. 2024;(3):137–140. (In Russ.) Available at: file:///C:/Users/User/Downloads/NTVP_3_2024.pdf (accessed 10.06.2025).
24. Podolskaya E.E., Tarkivskiy V.E., Sviridova S.A., Ivanov A.B. Regulatory and Methodological Support for Agricultural Machinery Testing. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2022;(5):18–21. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.33267/2072-9642-2022-5-18-20
25. Mironov D.A. Operational and Resource Tests of Import-substituting Working Bodies of the Combined Unit. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2022;(6):34–37. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.33267/2072-9642-2022-6-34-37
26. Basiniuk V.L., Volkotrub R.E., Lobkova M.P., Glazunova A.A. Accelerated Testing and Rapid Analysis of Service Properties of Structural Materials. *Actual Issues of Machine Studies*. 2024;13:119–122. https://elibrary.ru/nslrji
27. Balkarov R.A., Ashabokov Kh.Kh. Preservation and Corrosion Protection of Agricultural Machinery in the Conditions of KBR. *Izvestiya of Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov*. 2024;(1):88–98. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.55196/2411-3492-2024-1-43-88-98
28. Badalyan V.G., Vopilkin A.Kh. Application of Neural Networks in Ultrasonic Non-Destructive Testing (Review). *Testing. Diagnostics.* 2022;(5):12–25. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.14489/td.2022.05.pp.012-025
29. Dolmatov D.O. Application of Artificial Neural Networks for Solving Problems of Acoustic Nondestructive Testing (Review). *Testing. Diagnostics*. 2023;(11):44–50. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.14489/td.2023.11.pp.044-050
30. Pourhashem S., Saba F., Duan J., Rashidi A., Guan F., Nezhad E.G. Polymer/Inorganic Nanocomposite Coatings with Superior Corrosion Protection Performance: A Review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry.* 2020;88:29–57 https://doi.org/10.1016/j.jiec.2020.04.029
31. Purcell W., Neubauer T. Digital Twins in Agriculture: A State-of-the-Art Review. Smart Agricultural Technology. 2023;3:100094. https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100094
32. Sun R., Zeng Z., Zhu Y. Case Study on the Failure of World Agricultural Machinery IPO. *Highlights in Business, Economics and Managemen*t. 2024;37:55–63. https://doi.org/10.54097/nxegwt47
33. Hamid Z.A. Reducing the Wear and Corrosion of the Agricultural Mower Steel Knives by Electrodeposition Nanocomposite Coatings – Review. *Egyptian Journal of Chemistry*. 2020;63(3):3075–3095. https://doi.org/10.21608/EJCHEM.2020.28677.2615

34. Li X., Li Ya., Li F., Huang Z., Chen H. Failure Analysis and Experimental Study on Bolted Composite Based on Continuum Damage Mechanics. *Composite Structures*. 2023;303:116274. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116274
35. Zhizdyuk A.A., Builov V.N., Chumakova S.V., Akhilbekov M.N. Application of Digital Twins of Technological Farm Machines During Their Operation and Maintenance. *Agricultural Engineering*. 2025;27(1):20–25. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-20-25
36. Liu H., Zhang L., Zhao B., Tang J., Luo J., Wang Sh. Research on Emergency Scheduling Based on Improved Genetic Algorithm in Harvester Failure Scenarios. *Frontiers in Plant Science*. 2024:15:1413595. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1413595
37. Hwang In.S., Kim J.H., Im W.T., Jeung H.H., Nam Ju.S., Shin Ch.S. Analyzing Safety Factors and Predicting Fatigue Life of Weak Points in an Electrically Driven, Multi-Purpose Cultivation Tractor. *Agriculture.* 2024;14(3):416. https://doi.org/10.3390/agriculture14030416
38. Zhang H., Chen Ya., Cong J., Liu Ju., Zhang Zh., Zhang X. Reliability Study of an Intelligent Profiling Progressive Automatic Glue Cutter Based on the Improved FMECA method. *Agriculture*. 2023; 13 (8): 1475. https://doi.org/10.3390/agriculture13081475
39. Gehling T., Schieppati Ja., Balasooriya W., Kerschbaumer R.Ch., Pinter G. Fatigue Behavior of Elastomeric Components: A Review of the Key Factors of Rubber Formulation, Manufacturing, and Service Conditions. Polymer Reviews. 2023;63(3):763–804. https://doi.org/10.1080/15583724.2023.2166955
40. Ushakov M.V., Kutepov S.N., Kalinin A.A., Grechishkina E.A. Research of the Corrosion Resistance of Combined Metallization and Paint Protective Coatings. *Izvestiya Tula State University.* 2023;(5:)319–325. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.24412/2071-6168-2023-5-319-320
41. Mozgovoy N.I., Rachenkova M.S. Improving Corrosion Resistance of Agricultural Machinery Parts by Oxicarbonidation. *Agrotekhnika i energoobespechenie.* 2022;(4):182–187. (In Russ., abstract in Eng.) https://elibrary.ru/ocauqp
42. Dorokhov A.S., Kataev Yu.V., Kostomakhin M.N., Petrishchev N.A., Pestryakov E.V., Sayapin A.S. Management of the Technical Condition of Agricultural Machinery Using Digital Technologies. *Rossijskaâ sel'skohozâjstvennaâ nauka*. 2024;(5):51–56. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.31857/s2500262724050102
43. Karaseva T.N. Assessment of the Corrosion Activity of Mineral Fertilizers. *Technology and Innovation*. 2022:179–181. https://elibrary.ru/dfpvnq
44. Das K. A Comparative Study of Exponential Distribution vs Weibull Distribution in Machine Reliability Analysis in a CMS Design. Computers & Industrial Engineering. 2008;54(1):12–33. https://doi.org/10.1016/j.cie.2007.06.030
45. Sizaya O.I., Kvashuk Yu.V., Korolyov O.O., Dmytriiev V.A., Pavlenko A.H., Savchenko O.M. Corrosion of Structural Steels under the Action of N, S-Containing Mineral Fertilizers. Materials Science. 2021;57:119–127. https://doi.org/10.1007/s11003-021-00522-5
46. Hozhimatov A. Analysis of Destruction and Protection of Details of Agricultural Machinery. E3S Web of Conferences. 2023;383:04064. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338304064
47. Al-Goul S.T., Abdel-Hamid S.M.S., Bassyouni M. Enhanced Corrosion Resistance of Mild Steel in Acidic Media Using PVA-Chitosan-Dopamine Composite Coatings. *ChemistrySelect.* 2024;9(30):202402161. https://doi.org/10.1002/slct.202402161
48. Popovych P.V., Slobodyan Z.B. Corrosion and Electrochemical Behaviors of 20 Steel and St.3 Steel in Ammonium Sulfate and Nitrophoska. *Materials Science.* 2014;49:819–826. https://doi.org/10.1007/s11003-014-9679-6

About the authors:

Nikolay V. Limarenko, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Instrumentation and Biomedical Engineering, Chief Researcher of the RSM-Star Research Laboratory of the Institute of Advanced Mechanical Engineering FSBEI, Don State Technical University (1 Gagarin

Square, Rostov-on-Don 344000, Russian Federation), ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3075-2572, Researcher ID: O-5342-2017, nlimarenko@donstu.ru

Dmitry N. Savenkov, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technology and Food Production Technologies, Head of the Research Laboratory RSM-Star of the Institute of Advanced Mechanical Engineering, Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344000, Russian Federation), ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4546-424X, savenkov-dstu@yandex.ru

Dmitry I. Gladkih, Postgraduate Student of the Department of Metal-Cutting Machines and Tools, Research Fellow of the RSM-Star Research Laboratory of the Institute of Advanced Mechanical Engineering, Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344000, Russian Federation), ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2292-256X, Researcher ID: HDM-6104-2022, ya@dgladckih.ru

Alexey A. Shcherbakov, Assistant at the Department of Food Production Engineering and Technology, Research Fellow at the RSM-Star Research Laboratory of the Institute of Advanced Mechanical Engineering, Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344000, Russian Federation), ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6856-2219, Researcher ID: GQI-3325-2022, aatsherbakov@donstu.ru

Authors contribution:

N. V. Limarenko – controlling and mentoring the study planning and conducting; formulating the study ideas, aims and objectives; preparing and presenting the manuscript, specifically visualizing and presenting the data.

D. N. Savenkov – conducting the study, specifically performing the experiments, collecting data; preparing and presenting the manuscript, specifically visualizing and presenting the data.

D. I. Gladkih – conducting the study, specifically performing the experiments, collecting data; preparing and presenting the manuscript, specifically visualizing and presenting the data.

A. A. Shcherbakov – conducting the study, specifically performing the experiments, collecting data; preparing and presenting the manuscript, specifically visualizing and presenting the data.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 14.04.2025; revised 22.04.2025; accepted 13.05.2025

https://vestnik.mrsu.ru ISSN 2658-4123, eISSN 2658-6525

ТРЕНИЕ И ИЗНОС В МАШИНАХ / FRICTION AND WEAR IN MACHINES

https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202503.554-572
EDN: https://elibrary.ru/dpqfho
УДК 620.193/.197:629.7.035.5

Оригинальная статья / Original article

Снижение коррозионной активности противообледенительной жидкости для обработки воздушных судов перед полетом

И. В. Фадеев[1]✉, **А. В. Шемякин**[2], **И. А. Успенский**[2], **М. Н. Чаткин**[3], **И. А. Юхин**[2]
[1] *Чувашский государственный педагогический университет имени И. Я. Яковлева, г. Чебоксары, Российская Федерация*
[2] *Рязанский государственный агротехнологический университет имени П. А. Костычева, г. Рязань, Российская Федерация*
[3] *Национальный исследовательский Мордовский государственный университет, г. Саранск, Российская Федерация*
✉ *ivan-fadeev-2012@mail.ru*

Аннотация

Введение. Противообледенительные жидкости для обработки воздушных судов и беспилотных летательных аппаратов перед полетом содержат гликоли, поверхностно-активные вещества, загустители и ингибиторы коррозии, которые обеспечивают их функциональные свойства, но негативно воздействуют на элементы конструкции воздушных судов, снижая коррозионную стойкость и механические характеристики, и окружающую среду. Следовательно, токсичные ингибиторы в составе противообледенительной жидкости необходимо заменить на нетоксичные, на чем основана актуальность настоящего исследования.

Цель исследования. Обоснование возможности применения монобората калия как ингибитора коррозии и снижения токсичности противообледенительной жидкости.

Материалы и методы. Образцы из сплава В95пч в течение 30 суток выдерживали в 50%-м растворе противообледенительной жидкости Maxflight 04 без и с моноборатом калия концентрацией от 0 до 6,0 г/л, затем извлекали, очищали от продуктов коррозии, взвешивали. Ингибиторные свойства оценивали по потерям массы образцов, рассчитывали скорость коррозии, ингибиторный эффект, степень защиты. Для изучения эффективности действия монобората калия на коррозионно-усталостную прочность сплава снимали кривые циклической прочности образцов.

© Фадеев И. В., Шемякин А. В., Успенский И. А., Чаткин М. Н., Юхин И. А., 2025

Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Результаты исследования. Лучшие ингибиторные свойства монобората калия в 50%-м растворе Maxflight 04 проявляются при концентрации 5 г/л, что подтверждает оптимальность такой концентрации. Коррозионно-усталостные испытания показали, что моноборат калия концентрацией 5 г/л в растворе Maxflight 04 увеличивает циклическую прочность сплава.
Обсуждение и заключение. Моноборат калия является эффективным ингибитором в составе противообледенительной жидкости. Он практически не оказывает вредного воздействия на организм человека и окружающую среду, относится к 4-му классу опасности. Практическая значимость работы заключается в том, что введение монобората калия в состав противообледенительной жидкости Maxflight 04 в концентрации 5 г/л обеспечивает повышение эксплуатационной надежности элементов конструкции воздушных судов и беспилотных летательных аппаратов, особенно при длительной наработке и работе в условиях циклических нагрузок. Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением спектра изучаемых борсодержащих соединений, а также с комплексным анализом их ингибирующих свойств в отношении алюминиевых, магниевых и титановых сплавов, применяемых в авиационной технике.

Ключевые слова: воздушное судно, беспилотные летательные аппараты, противообледенительная жидкость, сплав В95пч, коррозия, ингибитор коррозии, циклическая прочность, моноборат калия

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Фадеев И.В., Шемякин А.В., Успенский И.А., Чаткин М.Н., Юхин И.А. Снижение коррозионной активности противообледенительной жидкости для обработки воздушных судов перед полетом. *Инженерные технологии и системы.* 2025;35(3):554–572. https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202503.554-572

Reducing Corrosive Activity of Deicing Liquid for Pre-Flight Treatment of Aircraft

I. V. Fadeev[a]✉, **A. V. Shemyakin**[b], **I. A. Uspensky**[b], **M. N. Chatkin**[c], **I. A. Yukhin**[b]
[a] *Chuvash State Pedagogical University named after I. Ya. Yakovlev, Cheboksary, Russian Federation*
[b] *Ryazan State Agrotechnological University named after P. A. Kostychev, Ryazan, Russian Federation*
[c] *National Research Mordovia State University, Saransk, Russian Federation*
✉ *ivan-fadeev-2012@mail.ru*

Abstract

Introduction. Deicing liquids for pre-flight treatment of aircraft and unmanned aerial vehicles contain glycols, surfactants, thickeners and corrosion inhibitors, which provide their functional properties, but have a negative impact on the aircraft structural elements reducing corrosion resistance and mechanical characteristics, and on the environment. Therefore, toxic inhibitors in the deicing liquids should be replaced with non-toxic ones that explain the relevance of the study.

Aim of the Study. The study is aimed at justifying the possibility of using potassium monoborate as a corrosion inhibitor to reduce the toxicity of the deicing liquids.
Materials and Methods. For 30 days the samples of the V95pch alloy were kept in a 50% solution of the deicing liquids Maxflight 04 without potassium monoborate and with potassium monoborate with a concentration of 0 to 6.0 g/l, and then the samples were removed, cleaned of corrosion products, and weighed. Inhibitory properties were assessed by the mass loss of samples; there were calculated the corrosion rate, inhibitory effect, and degree of protection. To study the effect of the potassium monoborate on the corrosion-fatigue strength of the alloy, there were recorded cyclic strength curves of the samples.
Results. The best inhibitory properties of potassium monoborate in the 50% Maxflight 04 solution manifest themselves at a concentration of 5 g/l that confirms the optimality of this concentration. Corrosion-fatigue tests have shown that potassium monoborate at a concentration of 5 g/l in the Maxflight 04 solution increases the cyclic strength of the alloy.
Discussion and Conclusion. Potassium monoborate is an effective inhibitor in the composition of the deicing liquids. It has no harmful effects on the human body and environment, and belongs to the 4th hazard class. The practical significance of the study is that the introduction of potassium monoborate into the composition of the deicing liquids Maxflight 04 at a concentration of 5 g / l ensures an increase in the serviceability of the structural elements of aircraft and unmanned aerial vehicles, especially during long-term operation and work under cyclic loads. Further research prospects are concerned with expanding the range of boron-containing compounds under study, and with a comprehensive analysis of their inhibitory properties to use these compounds in aluminum, magnesium and titanium alloys used in aviation technology.

Keywords: aircraft, unmanned aerial vehicles, deicing liquid, V95pch alloy, corrosion, corrosion inhibitor, cyclic strength, potassium monoborate

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

For citation: Fadeev I.V., Shemyakin A.V., Uspensky I.A., Chatkin M.N., Yukhin I.A. Reducing Corrosion Activity of Deicing Liquid for Pre-Flight Treatment of Aircraft. *Engineering Technologies and Systems.* 2025;35(3):554–572. https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202503.554-572

ВВЕДЕНИЕ

Наземная противообледенительная обработка внешних поверхностей воздушного судна (ВС) противообледенительной жидкостью (ПОЖ) регламентируется международными[1] и российскими[2] стандартами и необходима для обеспечения безопасности полетов. Основная функция ПОЖ заключается в удалении снежно-ледяных отложений (в нагретом до +60…+70 °С виде) и предотвращения их повторного образования (в холодном виде) [1]. Применяемые жидкости классифицируются на ньютоновские (I тип) и неньютоновские (II, III и IV типы), что обуславливает разную длительность их защитного эффекта. Жидкости I типа предназначены для применения в нагретом виде в основном для удаления снежно-ледяных отложений с поверхностей ВС и кратковременной защиты ВС. Для долговременной защиты используются жидкости II, III и IV типов.

[1] ISO 11076:2020. Aircraft – Deicing/Anti-Icing Methods on the Ground [Электронный ресурс]. URL: https://www.iso.org/standard/74304.html (дата обращения: 21.10.2024).

[2] ГОСТ Р 54264-2010. Воздушный транспорт. Система технического обслуживания и ремонта авиационной техники. Методы и процедуры противообледенительной обработки самолетов. Общие требования [Электронный ресурс]. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200085982 (дата обращения: 21.10.2024).

Из-за присутствия в их составе загустителя они имеют большую вязкость и образуют на поверхности пленку, принимающую на себя осадки и препятствующую их примерзанию к поверхности ВС [2].

Состав ПОЖ определяется их функциональным назначением и включает в себя гликоли (до 95 %) [3], антикоррозионные добавки [4; 5], поверхностно-активные вещества (ПАВ) [6; 7], загустители [2] и вспомогательные компоненты. Из-за наличия гликоля ПОЖ имеет температуру замерзания значительно ниже, чем у воды (до −60 °C) [3].

Однако гликоли и некоторые другие компоненты обладают высокой коррозионной активностью и токсичностью [3; 4; 7], что приводит к ускорению процессов коррозии и усталостного разрушения конструкционных материалов ВС. Это особенно критично для ВС с большой наработкой, у которых присутствие скрытых очагов коррозии и усталостных повреждений увеличивает риск аварийных ситуаций. Известны катастрофы, связанные с усталостным разрушением элементов конструкции ВС.

Вопрос обработки ПОЖ актуален и для беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), дронов и малой авиации, которые находят все более широкое применение в различных отраслях, включая сельское хозяйство. Использование данных аппаратов является одним из наиболее перспективных направлений, так как они обеспечивают высокую эффективность в сборе и анализе данных. Для достижения максимальной продуктивности в сельском хозяйстве важно обладать своевременной и точной информацией о характере территории, включая площадь, рельеф и особенности почвы. Одним из наиболее эффективных методов получения таких данных является применение беспилотников. В ходе короткого полета они могут собирать детализированную информацию об исследуемом объекте, формировать ортофотопланы, выполнить аэрофото- и видеосъемку, проводить тепловизионную съемку, создавать трехмерные модели рельефа, осуществлять лазерное сканирование, а также выполнять обработку растений и плодовых деревьев с помощью опрыскивания. Эти возможности БПЛА позволяют оперативно контролировать сельскохозяйственные процессы на полях и принимать обоснованные решения для их оптимизации.

В сельском хозяйстве используют два вида БПЛА: самолетного типа, характеризующиеся высокими аэродинамическими показателями, удобные для облета больших территорий, и коптерные беспилотники или дроны для точечной съемки, обследования небольшого земельного участка, трехмерного моделирования, обработки полей опрыскиванием.

После нанесения ПОЖ на поверхностях БПЛА образуется противообледенительное тонкое покрытие с противоадгезионными и противокоррозионными свойствами, устойчивое к воздействию низких температур, которое уменьшает обледенение обработанных поверхностей, облегчает очистку от мокрого снега и льда.

При обработке самолета 75–80 % состава стекает на землю [8], часть сдувается ветром во время взлета ВС. Это негативно влияет на окружающую среду, что обусловливает необходимость повышения экологических свойств ПОЖ [3; 4; 6].

В первую очередь желательно заменить входящие в состав ПОЖ токсичные ингибиторы коррозии на нетоксичные, поэтому исследования по разработке эффективных и нетоксичных ингибиторов коррозии являются актуальными и востребованными. В качестве такого ингибитора коррозии впервые предлагается использовать моноборат калия (KBO_2) (МБК), что составляет научную новизну исследования.

Цель исследования – доказать возможность применения МБК в качестве эффективного и экологически безвредного ингибитора коррозии в составе ПОЖ для снижения интенсивности коррозионных и коррозионно-усталостных процессов, протекающих в элементах конструкции ВС под воздействием ПОЖ.

Задачи: проанализировать информацию по теме исследования и выбрать пути реализации цели; исследовать влияние МБК на коррозионные характеристики ПОЖ; на основе полученных данных сформулировать выводы и разработать рекомендации по повышению экологичности и улучшению коррозионной характеристики ПОЖ.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Современные исследования в области разработки ПОЖ акцентируют внимание на двух ключевых проблемах: обеспечении высокой эффективности удаления и предотвращения образования наледи и снижении их токсичности и коррозионной активности. Согласно ГОСТ Р 54264-2010[3] и Международному авиационному стандарту[4] ПОЖ должны одновременно обеспечивать безопасность полетов и соответствовать экологическим требованиям.

Наиболее распространенными компонентами ПОЖ являются гликоли, ПАВ, загустители и антикоррозионные добавки [2; 3; 6]. Однако в ряде работ отмечено, что гликоли обладают высокой коррозионной активностью, а их продукты разложения оказывают токсическое воздействие на окружающую среду [3; 8]. Аналогичные результаты приводят зарубежные авторы: исследования в США и Европе показали значительное накопление пропилен- и этиленгликоля в почвах и водоемах вблизи аэропортов, что приводит к деградации экосистем [9–11].

Коррозионная активность ПОЖ остается одной из наиболее актуальных проблем их применения. Российские ученые подчеркивают необходимость замены традиционных ингибиторов (например, на основе нитритов и аминосоединений), которые снижают прочностные характеристики алюминиевых сплавов и ускоряют усталостное разрушение [4; 5; 12]. Зарубежные публикации также подтверждают, что использование традиционных органических ингибиторов приводит к снижению долговечности алюминиевых и магниевых сплавов, широко применяемых в авиации [13; 14].

Одним из направлений снижения агрессивности ПОЖ является применение новых классов ингибиторов коррозии. В Российской Федерации активно изучаются соединения калия и бора, в том числе амидоборатные комплексы и соли

[3] ГОСТ Р 54264-2010. Воздушный транспорт. Система технического обслуживания и ремонта авиационной техники. Методы и процедуры противообледенительной обработки самолетов. Общие требования.

[4] ISO 11076:2020. Aircraft – Deicing/Anti-Icing Methods on the Ground.

щелочных металлов [15–17]. Эти работы показали, что борсодержащие соединения способны замедлять электрохимические процессы коррозии и одновременно снижать токсичность рабочих растворов. В международной практике также рассматриваются перспективы использования неорганических ингибиторов на основе бора и фосфатов, обладающих низкой экологической опасностью [18; 19]. При этом зарубежные исследования отмечают необходимость оптимизации концентраций – при превышении определенных доз некоторые соединения утрачивают ингибирующую способность или изменяют реологические свойства жидкостей. Схожий эффект выявлен и в настоящем исследовании для МБК, оптимальная концентрация которого составляет 5 г/л.

Существенная часть исследований посвящена влиянию ПАВ и загустителей на эксплуатационные свойства ПОЖ. Российские исследования [6; 7; 20] показали, что правильный подбор этих компонентов определяет вязкость, смачиваемость и адгезионные характеристики покрытий. Аналогичные выводы приводятся в зарубежных публикациях: модифицированные полимерные загустители и биоразлагаемые ПАВ способны одновременно повышать продолжительность защитного эффекта и снижать токсичность жидкости [21–23].

С экологической точки зрения актуальна проблема утилизации ПОЖ. При наземной обработке ВС до 80 % жидкости попадает на грунт, загрязняя его [8; 24]. Аналогичные выводы приводятся в работах европейских ученых, подтверждающих, что главным источником техногенной нагрузки аэропортов в зимний период являются именно стоки ПОЖ [25; 26]. Это определяет необходимость разработки составов на основе биоразлагаемых ингибиторов.

Таким образом, анализ литературы показывает следующее:

– проблема токсичности и коррозионной активности ПОЖ признана как в отечественных, так и в зарубежных исследованиях;

– классические ингибиторы (нитриты, аминокомпоненты) постепенно заменяются экологически безопасными соединениями на основе бора, фосфатов и калия;

– остается открытым вопрос поиска оптимальных концентраций и сочетаний компонентов, обеспечивающих одновременно высокие противообледенительные, антикоррозионные и экологические свойства;

– недостаточно исследовано влияние новых ингибиторов на усталостную прочность алюминиевых авиационных сплавов, что и составляет основной вклад рассматриваемой работы.

Именно на решение этих вопросов и проверку эффективности МБК как ингибитора коррозии в составе ПОЖ и его влияния на коррозионно-усталостные характеристики авиационных сплавов направлено настоящее исследование.

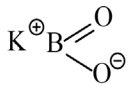
МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалы исследования

В российских аэропортах и в аэропортах Московского авиационного узла в основном используются ПОЖ OctafloEG, отнесенная к типу I, и Maxflight 04 на основе пропиленгликоля, деионизированной воды, загустителя и функциональных химических компонентов, отнесенная к типу IV [8].

ПОЖ Maxflight 04 соответствует требованиям международных и российских стандартов, сертифицирована в системе ГОСТ Р, допущена Росавиацией к применению на самолетах. Выпускается по техническим условиям ТУ 2422-002-70090832-2007 с изм. № 1 и 2 и поставляется в авиапредприятия Российской Федерации и Государств Евразийского Союза[5] с 2006 г. Из ГОСТ 12.1.007.76[6] и источника[7] известно, что по степени воздействия на организм человека Maxflight 04 относится к 4-му классу опасности.

Выбор МБК в качестве ингибитора коррозии был основан на предварительном патентном исследовании ингибиторов, содержащих калий. Проведенный анализ показал, что соединения калия обладают антикоррозионными свойствами, что делает их перспективными для применения в качестве ингибиторов коррозии. Дополнительный обзор литературных источников [13–15] подтвердил, что отдельные борсодержащие соединения проявляют смачивающие и ингибирующие свойства в водных средах, а также являются экологически безопасными добавками (относятся к 4-му классу опасности) и могут быть использованы для снижения коррозионной активности растворов технических жидкостей. На основе изложенного в работе в качестве ингибитора коррозии исследован МБК, имеющий следующую структурную схему [12]:



Моноборат калия (порошок, молекулярная масса 81,9 г/моль)
Potassium monoborate (powder, molecular weight 81.9 g/mol)

Методы исследования ингибиторных свойств монобората калия

Эксперименты проводились с образцами 100×30×2 мм из алюминиевого сплава В95пч, широко используемого в авиастроении [8], ПОЖ Maxflight 04 и МБК.

В каждом опыте было по три образца, что соответствует количеству параллельных опытов. Образцы были изготовлены из листового материала сплава В95пч одной партии с использованием гильотинных механических ножниц, что обеспечивало их идентичность по химическому составу, структуре и механическим характеристикам. Для подготовки поверхности осуществлялось удаление заусенцев, первичных продуктов коррозии и окалины механическим способом. Далее проводилась маркировка, после чего образцы измеряли штангенциркулем с нониусной шкалой, имеющей цену деления 0,1 мм. Массу образцов определяли с помощью аналитических весов ВЛА-200 г-М, обеспечивающих точность измерений до 0,0001 г, а полученные данные фиксировались в специальной таблице.

[5] ЭдвансНефтеХим. Max Flight 04 (тип IV) [Электронный ресурс] : сайт. URL: https://clck.ru/3P2YVi (дата обращения: 21.10.2024).

[6] ГОСТ 12.1.007.76. Система стандартов безопасности труда. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности [Электронный ресурс]. URL: https://docs.cntd.ru/document/5200233 (дата обращения: 21.10.2024)

[7] ЭдвансНефтеХим. Max Flight 04 (тип IV).

Перед проведением дальнейших исследований образцы подвергались обезжириванию этиловым спиртом, после чего высушивались и хранились в эксикаторах с силикагелем для предотвращения воздействия влаги. Испытания проводились в растворах ПОЖ Maxflight 04 без и с добавлением МБК (концентрациями 1,0–6,0 г/л). Вертикально подвешенные образцы выдерживались в растворах при комнатной температуре (20–22 °С) в течение 30 сут. Объем растворов был не менее 10–15 см^3 на 1 см^2 образца.

Концентрация ПОЖ Maxflight 04 в ее водном растворе составляла 50 %. Оценка ингибиторной эффективности проводилась на основе анализа уменьшения массы образцов, которые подвергались воздействию исследуемых растворов в течение 30 сут. Контролем служил 50%-й водный раствор ПОЖ Maxflight 04. Опыты проводились в трехкратной повторности. По полученным данным рассчитывали скорость коррозии (K), ингибиторный эффект (γ) и степень защиты (Z).

Скорость коррозионного повреждения K определяли путем измерения изменения массы образцов, отнесенного к единице площади поверхности за фиксированный интервал времени согласно формуле (1). Результаты выражали в г/м^2 · год [24]:

$$K = \frac{M_1 - M_2}{S \cdot T} \cdot 10\ 000 \cdot 8\ 760, \tag{1}$$

где M_1 и M_2 – масса образца до и после испытаний, г; S – площадь поверхности образца, см^2; T – время экспозиции образца в растворе электролита, ч; 10 000 – коэффициент пересчета единиц измерения площади (из м^2 в см^2); 8 760 – общее количество часов в году.

Площадь образцов определяли по формуле:

$$S = 2\left[\left(a+b\right)b + ac\right] - \frac{\pi d^2}{2} + \pi dc, \tag{2}$$

где a, b, c – размеры образцов, см; π – математическая постоянная (3,14); d – диаметр отверстия для подвешивания образца, см.

После подстановки выражения (2) в (1) получили:

$$K = \frac{M_1 - M_2}{2\left[ab + \left(a+b\right)c\right] + \frac{\pi d^2}{2} + \pi dc} \frac{10\ 000 \cdot 8\ 760}{T}.$$

Результаты измерений, взвешиваний и расчетов заносили в таблицу.

Для оценки эффективности ингибитора применяли коэффициент ингибирования, вычисляемый по следующей формуле:

$$\gamma = \frac{K_0}{K},$$

где K_0 – скорость коррозии без добавления ингибитора, г/м^2·год; K – скорость коррозии в его присутствии, г/м^2 · год.

Степень защитного действия ингибитора, отражающую эффективность подавления коррозионного разрушения, определяли в процентах согласно соответствующей расчетной зависимости:

$$Z = \frac{K_0 - K}{K_0} 100\ \%.$$

Методы исследования влияния монобората калия на коррозионно-усталостную прочность сплава В95пч

Элементы конструкции ВС работают в условиях коррозионного разрушения и воздействия на них циклических напряжений [4]. Для оценки влияния МБК на коррозионно-усталостную прочность сплава В95пч использовалась методика, представленная в [12]. Испытания проводились на образцах в условиях воздействия циклических нагрузок и коррозионной среды, что имитировало эксплуатационные условия конструктивных элементов воздушных судов.

Для количественной характеристики влияния коррозии на металлы при циклических нагрузках применяют коэффициент запаса циклической прочности на заданной базе испытаний $\left(\Delta\sigma_N^C\right)$, а также показатель циклической долговечности материала, определяемый числом циклов до разрушения (N).

Для оценки влияния ингибиторов на коррозионно-усталостную прочность металлов необходимо построить кривые долговременной циклической прочности. При проведении испытаний использовали специализированную установку, аналогичную описанной в работе [7]. Образцы из сплава В95пч фиксировали в установке с использованием специальных крепежных элементов, помещая их в сосуд из органического стекла, заполненный испытуемым раствором. Для формирования циклических напряжений в образцах использовали метод симметричного изгиба с частотой 500 циклов в минуту.

Внутренние напряжения определяли по выражению:

$$\sigma = \pm \frac{3Ehf}{2l^2},$$

где E – модуль упругости испытуемого материала; h – толщина образца, мм; f – амплитуда изгиба, мм; l – рабочая длина образца, мм.

Рассчитывали $\Delta\sigma_N^C$, отражающее напряжения, при которых образцы разрушались в коррозионной среде.

Сравнивая эти показатели, а также число циклов до разрушения (N) в растворах с ингибитором и без него, оценивали его эффективность.

Для анализа влияния коррозии и коррозионно-механических факторов на снижение циклической прочности металла при определенном числе циклов N использовали следующее выражение [12]:

$$\Delta\sigma_N^r = \Delta\sigma_N^{p.c.} + \Delta\sigma_N^{c.-m.},$$

где $\Delta\sigma_N^r$ – общее снижение циклической прочности в коррозионной среде; $\Delta\sigma_N^{p.c.}$ – снижение циклической прочности за счет чисто коррозионных процессов; $\Delta\sigma_N^{c.-m.}$ – снижение циклической прочности, обусловленное совместным воздействием коррозионных и механических факторов.

Материалы и методики для проведения экспериментов обеспечили получение объективных результатов для реализации цели исследования.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование ингибиторных свойств монобората калия

Экспериментальные результаты, отражающие скорость коррозионного разрушения, ингибиторную эффективность и уровень защиты сплава В95пч от коррозии в течение 30 сут, представлены в таблице и на рисунках 1–3.

Увеличение присутствия МБК до 5 г/л в 50%-м растворе ПОЖ Maxflight 04 вызывает замедление скорости коррозии материала В95пч. В частности, за 30 сут она уменьшается от $10{,}49 \cdot 10^{-3}$ до $5{,}35 \cdot 10^{-3}$ г/м^2 · год (рис. 1), повышает ингибиторный эффект (γ) до 1,96 (рис. 2), степень защиты (Z) от коррозии до 49 % (рис. 3). При повышении его концентрации от 5 до 6 г/л ухудшаются все три характеристики, то есть наблюдается обратный эффект.

Таблица

Table

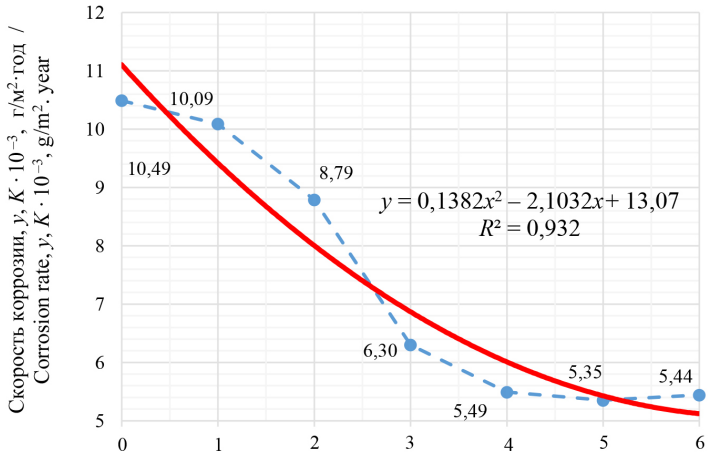
Результаты исследования ингибиторных свойств монобората калия в растворе противообледенительной жидкости Maxflight 04

The results of studying the inhibitory properties of potassium monoborate in the deicing liquid solution “Maxflight 04”

№№ образцов / №№ of samples	Коррозионная среда / Corrosive environment	Концентрация монобората калия в растворе, г/л / Potassium monoborate concentration in solution, g/l	Масса образца, г / Sample weight, g		Потеря массы, $\Delta M = M_1 - M_2$, г / Weight loss, $\Delta M = M_1 - M_2$, g	Площадь образца, S, см^2/ Samplearea, S, cm^2	Скорость коррозии по образцам, $K^i_{sam} \cdot 10^{-3}$, г/м^2 · год / Corrosion rate according to samples $K^i_{sam} \cdot 10^{-3}$, g/m^2 · year	Скорость коррозии средняя по образцам, $K_{sam} \cdot 10^{-3}$, г/м^2 · год / Average corrosion rate for samples $K_{sam} \cdot 10^{-3}$, g/m^2 · year	Ингибиторный эффект, γ / Inhibitory effect, γ	Степень защиты, Z, % / Degree of protection, Z, %
			до опыта, M_1 / prior to experiment, M_1	после опыта, M_2 / after experiment, M_2						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	50%-й раствор противообледенительной жидкости Maxflight 04 (контроль) / 50% solution of deicing liquid Maxflight 04 (control)	0	16,8057	10,8953	5,9104	61,6	11,67	10,49	1,0	0
2			16,4775	11,7565	4,7210	58,3	9,85			
3			16,4787	11,5906	4,8881	59,8	9,95			

Окончание таблицы / End of table

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
4	50%-й раствор противообледенительной жидкости Maxflight 04 + + моноборат калия / 50% solution of deicing liquid Maxflight 04 + + potassium monoborate	1	15,9817	10,9180	5,0637	61,0	10,11	10,09	1,04	3,8
5			15,9538	11,0800	4,8737	59,4	9,98			
6			16,1164	11,0732	5,0431	60,3	10,18			
7		2	16,5474	12,0732	4,4742	56,8	9,58	8,79	1,19	16,2
8			16,0905	12,4463	4,3273	58,7	8,97			
9			15,9010	12,2631	3,7606	58,4	7,83			
10		3	16,8403	13,6958	3,1444	61,3	6,25	6,30	1,66	39,9
11			16,7301	13,4745	3,2555	62,4	6,35			
12			16,7590	13,5220	3,2370	62,5	6,30			
13		4	16,4910	13,8720	2,6190	59,8	5,34	5,49	1,91	47,7
14			16,7010	14,0652	2,6358	56,9	5,67			
15			16,4050	13,7396	2,6654	59,4	5,47			
16		5	16,3660	13,7511	2,6149	60,1	5,29	5,35	1,96	49,0
17			16,5130	13,8780	2,6350	59,9	5,35			
18			16,0120	13,3481	2,6639	60,0	5,40			
19		6	17,0560	14,2615	2,7945	61,1	5,56	5,44	1,93	48,1
20			16,6550	13,7941	2,6609	60,5	5,35			
21			17,5210	14,8152	2,7058	60,9	5,41			

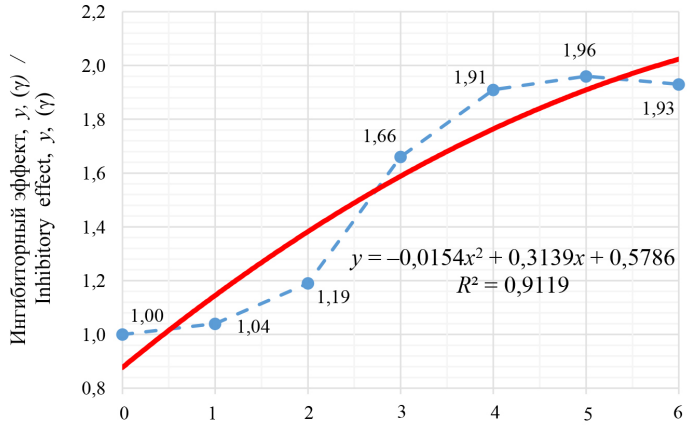


Концентрация монобората калия в 50%-м растворе противообледенительной жидкости Maxflight 04, *x*, г/л / Potassium monoborate concentration in 50% "Maxflight 04" deicing liquid solution, *x*, g/l

Р и с. 1. Зависимость скорости коррозии сплава В95пч в 50%-м растворе противообледенительной жидкости Maxflight 04 от концентрации монобората калия за 30 сут: ——— – линия тренда (полиномиальная); R^2 – коэффициент достоверности

F i g. 1. Corrosion rate dependence of V95pch alloy in 50% "Maxflight 04" deicing liquids solution on potassium monoborate concentration for 30 days: ——— – trend line (polynomial); R^2 – confidence factor

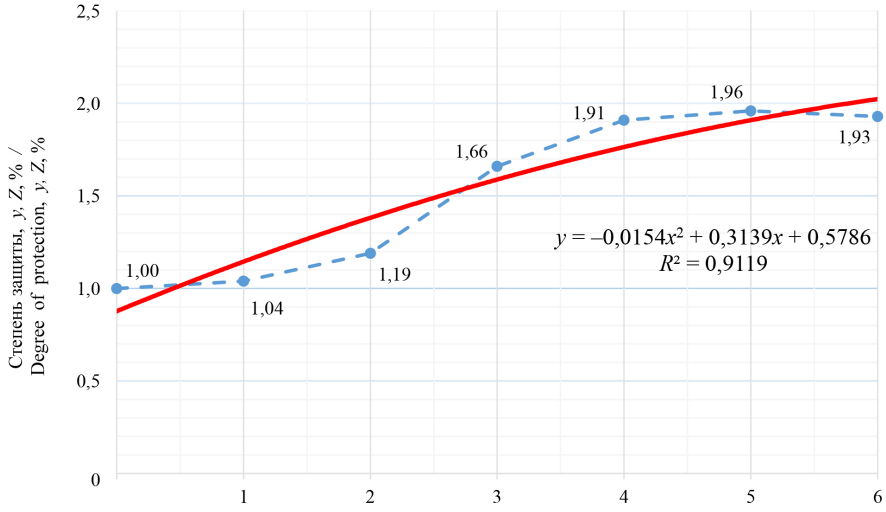
Источник: здесь и далее рисунки составлены авторами статьи.
Source: hereinafter in this article the diagrams are compeled by the authors of the article.



Концентрация монобората калия в 50%-м растворе противообледенительной жидкости Maxflight 04, *x*, г/л / Potassium monoborate concentration in 50% "Maxflight 04" liquid solution, *x*, g/l

Р и с. 2. Влияние концентрации монобората калия на ингибиторный эффект в 50%-м растворе противообледенительной жидкости Maxflight 04 за 30 сут:
– линия тренда (полиномиальная); R^2 – коэффициент достоверности

F i g. 2. Effect of potassium monoborate concentration on the inhibitory effect in 50% "Maxflight 04" liquid solution for 30 days:
– trend line (polynomial) R^2 – confidence factor



Концентрация монобората калия в 50%-м растворе противообледенительной жидкости Maxflight 04, *x*, г/л / Potassium monoborate concentration in 50% "Maxflight 04" liquid solution, *x*, g/l

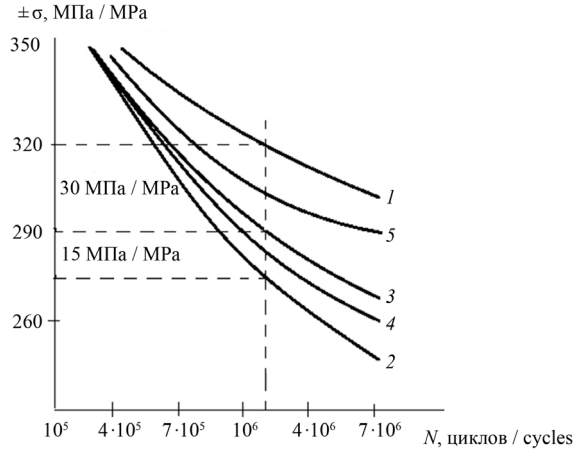
Р и с. 3. Зависимость степени защиты сплава В95пч от коррозии в 50%-м растворе противообледенительной жидкости Maxflight 04 от концентрации монобората калия за 30 сут:
– линия тренда (полиномиальная); R^2 – коэффициент достоверности

F i g. 3. Dependence of the protection degree of the V95pch alloy from corrosion in a 50% solution of "Maxflight 04" deicing liquid on the concentration of potassium monoborate for 30 days:
– trend line (polynomial); R^2 – confidence factor

Полученные результаты согласуются с данными ранее проведенных исследований других авторов [12; 15; 17], что подтверждает их достоверность и практическую значимость.

Исследование влияния монобората калия на коррозионно-усталостную прочность сплава В95пч

Графические данные, полученные в ходе исследований усталостной и коррозионно-усталостной прочности сплава В95пч в 50%-м растворе ПОЖ Maxflight 04 как без добавления МБК, так и с его присутствием, представлены на рисунке 4.



Р и с. 4. Графическое представление зависимости усталостной и коррозионно-усталостной прочности сплава В95пч:
1 – в атмосферных условиях; *2* – в 50%-м растворе противообледенительной жидкости Maxflight 04; *3* – в 50%-м растворе противообледенительной жидкости Maxflight 04 с добавлением 5 г/л монобората калия; *4* – в атмосферных условиях после предварительного воздействия 50%-го раствора противообледенительной жидкости Maxflight 04; *5* – в атмосферных условиях после предварительного воздействия 50%-го раствора противообледенительной жидкости Maxflight 04 с 5 г/л монобората калия; σ – внутреннее напряжение металла, МПа; *N* – количество циклов до разрушения

F i g. 4. Graphical representation of the dependence of fatigue and corrosion-fatigue strength of the V95pch alloy:
1 – under atmospheric conditions; *2* – in a 50% solution of the deicing liquid “Maxflight 04”; *3* – in a 50% solution of the deicing liquid “Maxflight 04” with the addition of 5 g/l potassium monoborate; *4* – under atmospheric conditions after preliminary treatment with a 50% solution of the deicing liquid “Maxflight 04”; *5* – under atmospheric conditions after preliminary treatment with a 50% solution of the deicing liquid “Maxflight 04” with 5 g/l potassium monoborate.
σ – internal stress of the metal, MPa; *N* – a number of cycles before failure

Анализ кривых *1*, *2* и *4* на рисунке 4 демонстрирует снижение циклической прочности металла под воздействием разрушительных факторов. Сравнительное изучение кривых *1* и *2* позволило установить, что совокупное снижение циклической прочности $\left(\Delta\sigma_N^r\right)$ сплава В95пч в 50%-м растворе ПОЖ Maxflight 04 при числе циклов $N = 2 \cdot 10^6$ составляет 45 МПа.

При этом применение исследуемого ингибитора позволяет уменьшить воздействие чисто коррозионных процессов на 33,3 % ($\Delta\sigma_N^{p.c.} = 15$ МПа) и снизить

влияние коррозионно-механических повреждений на 66,6 % $\left(\Delta\sigma_N^{c.-m.} = 30 \text{ МПа}\right)$, что подтверждается анализом кривых *3* и *2*, а также *3* и *1*. Сравнительное рассмотрение кривых *2* и *3*, а также *4* и *5* свидетельствует о том, что добавление МБК в концентрации 5 г/л в 50%-й раствор ПОЖ Maxflight 04 способствует повышению циклической прочности сплава В95пч. Это обусловлено ослаблением влияния разрушающих факторов на снижение циклической прочности данного материала (что видно из кривых *1*, *2* и *4*).

Результаты коррозионно-усталостных испытаний подтверждают, что введение МБК способствует увеличению коэффициента запаса циклической прочности сплава В95пч в исследуемых средах.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о высокой эффективности МБК в качестве ингибитора коррозии в составе ПОЖ. Он способствует снижению скорости коррозионного и коррозионно-усталостного разрушения, протекающих в элементах конструкции ВС и БПЛА под воздействием ПОЖ. Результаты исследования имеют практическую значимость и вносят определенный вклад в экологическую безопасность. 5 г/л МБК в составе 50%-го раствора ПОЖ Maxflight 04 снижает скорость коррозии сплава В95пч за 30 сут от $10{,}49 \cdot 10^{-3}$ до $5{,}35 \cdot 10^{-3}$ г/м^2·год, уменьшает разрушающий эффект чисто коррозионных поражений на 37,5 % $\left(\Delta\sigma_N^{p.c.} = 18 \text{ МПа}\right)$ и коррозионно-механических поражений на 62,5 % $\left(\Delta\sigma_N^{c.-m.} = 30 \text{ МПа}\right)$. Присутствие МБК в растворе ПОЖ Maxflight 04 способствует уменьшению влияния разрушительных факторов, что приводит к повышению циклической прочности сплава В95пч. Для снижения токсичности и коррозионной агрессивности ПОЖ рекомендуется использовать в их составе МБК концентрацией 5 г/л.

Практическая значимость работы заключается в том, что введение МБК в состав ПОЖ типа Maxflight 04 в концентрации 5 г/л обеспечивает повышение эксплуатационной надежности элементов конструкции ВС и БПЛА, особенно при длительной наработке и работе в условиях циклических нагрузок.

Перспективы дальнейших исследований в данной области связаны с расширением спектра изучаемых борсодержащих соединений, а также с комплексным анализом их ингибирующих свойств в отношении алюминиевых, магниевых и титановых сплавов, применяемых в авиационной технике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Плахотникова М.А., Серебреникова Ю.Г., Лысянников А.В., Кайзер Ю.Ф. Площадка для сбора противообледенительной жидкости в аэропорту «Емельяново». *Известия Тульского государственного университета. Технические науки.* 2015;(5–2):106–113. https://elibrary.ru/ulfazx
2. Куряшов Д.А., Башкирцева Н.Ю., Овчинникова Ю.С., Мингазов Р.Р., Сладовская О.Ю., Рахматуллин Р.Р. Загустители в составах противообледенительных жидкостей. *Вестник технологического университета.* 2015;18(5):77–79. https://elibrary.ru/touavp
3. Кашапова Н.Е., Башкирцева Н.Ю., Овчинникова Ю.С., Сладовская О.Ю., Мингазов Р.Р., Куряшов Д.А., и др. Воздействие гликолей в составе противообледенительных жидкостей на

окружающую среду. *Вестник технологического университета.* 2015;18(5):209–212. https://elibrary.ru/toubjl

4. Кашапова Н.Е., Башкирцева Н.Ю., Овчинникова Ю.С., Сладовская О.Ю., Мингазов Р.Р., Куряшов Д.А., и др. Влияние ингибиторов коррозии и ПАВ на токсикологические свойства противообледенительных жидкостей. *Вестник технологического университета.* 2015;18(5):221–223. https://elibrary.ru/toubkp
5. Сладовская О.Ю., Башкирцева Н.Ю., Овчинникова Ю.С., Мингазов Р.Р., Куряшов Д.А., Рахматуллин Р.Р. Ингибиторы коррозии в составах противообледенительных жидкостей. *Вестник технологического университета.* 2015;18(5):84–86. https://elibrary.ru/touawt
6. Румянцев М.С., Савинова М.В., Казанцев О.А., Квашенников А.И. Влияние поверхностно-активных веществ разного типа на реологические характеристики водно-гликолевых растворов полиакриловых загустителей. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Химия.* 2016;8(4):11–17. https://doi.org/10.14529/chem160402
7. Мингазов Р.Р., Башкирцева Н.Ю., Овчинникова Ю.С., Куряшов Д.А., Сладовская О.Ю., Рахматуллин Р.Р. Поверхностно-активные вещества в составах противообледенительных жидкостей. *Вестник технологического университета.* 2015;18(6):85–87. https://elibrary.ru/tsxadb
8. Солтанов С.Х. Экологические последствия применения противообледенительных жидкостей «OctafloEG» и «Maxflight 04» при обработке воздушных судов гражданской авиации в осенне-зимний период. *Международный научно-исследовательский журнал.* 2016;(6–2):140–143. https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.48.176
9. Breedveld G.D., Roseth R., Sparrevik M., Hartnik T., Hem L.J. Persistence of the De-Icing Additive Benzotriazole at an Abandoned Airport. *Water, Air, & Soil Pollution: Focus.* 2003;3:91–101. https://doi.org/10.1023/A:1023961213839
10. McNeill K.S., Cancilla D.A. Detection of Triazole Deicing Additives in Soil Samples from Airports with Low, Mid, and Large Volume Aircraft Deicing Activities. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology.* 2008;82:265–269 https://doi.org/10.1007/s00128-003-0063-8
11. Kiss A., Fries E. Occurrence of Benzotriazoles in the Rivers Main, Hengstbach, and Hegbach (Germany). *Environmental Science and Pollution Research.* 2009;16:702–710. https://doi.org/10.1007/s11356-009-0179-4
12. Фадеев И.В., Новоселов А.М., Садетдинов Ш.В. Влияние амидоборатного комплекса на коррозию и коррозионную усталость стали Ст. 10. *Приволжский научный журнал.* 2014;(3):31–35. https://elibrary.ru/snzksz
13. Cancilla D.A., Holtkamp A., Matassa L., Fang X. Isolation and Characterization of Microtox®-Active Components from Aircraft Deicing/Antiicing Fluids. *Environmental Toxicology and Chemistry.* 1997;16(3):430–434. https://doi.org/10.1002/etc.5620160306
14. Castro S., Davis L.C., Erickson L.E. Plant-Enhanced Remediation of Glycol-Based Aircraft Deicing Fluids. *Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management.* 2001;5(3):141–152. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-025X(2001)5:3(141)
15. Бышов Н.В., Полищук С.Д., Фадеев И.В., Садетдинов Ш.В. Ингибитор коррозии металлов для использования при ремонте автотракторной техники. *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса.* 2019;(2):265–275. https://doi.org/10.32786/2071-9485-2019-02-32
16. Бышов Н.В., Фадеев И.В., Александрова Г.А., Садетдинов Ш.В. Повышение противокоррозионных свойств растворов синтетических моющих средств для мобильной техники в АПК. *Известия Международной академии аграрного образования.* 2019;(45):20–24. https://elibrary.ru/lywytc
17. Успенский И.А., Фадеев И.В., Пестряева Л.Ш., Садетдинов Ш.В., Казарин А.С. Новые ингибиторы коррозии для защиты сельскохозяйственной техники. *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса.* 2020;(3):365–376. https://doi.org/10.32786/2071-9485-2020-03-39
18. Corsi S. R., Harwell G. R., Geis S. W., Bergmann D. Impacts of Aircraft Deicer and Anti-Icer Runoff on Receiving Waters from Dallas/Fort Worth International Airport, Texas, USA. *Environmental Toxicology and Chemistry.* 2006;25(11):2890–2900. https://doi.org/10.1897/06-100R.1

19. Giger W., Schaffner C., Kohler H.-P. Benzotriazole and Tolyltriazole as Aquatic Contaminants. Input and Occurrence in Rivers and Lakes. *Environmental Science & Technology.* 2006;40(23):17180965. https://doi.org/10.1021/es061565j
20. Бышов Н.В., Успенский И.А., Алексеев В.В., Фадеев И.В. Изменение контактных углов смачивания при добавлении в моющие растворы поверхностно-активных веществ. *Инженерные технологии и системы.* 2019;29(2):295–305. https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.295-305
21. Tetteh E., Loth E., Cummings J., Loebig J. Trends of Impact Ice Adhesion on Various Surfaces. *AIAA Journal.* 2021;59(5):1870–1874. https://doi.org/10.2514/1.J060034
22. Corsi S.R., Geis S.W., Loyo-Rosales J.E., Rice C.P. Aquatic Toxicity of Nine Aircraft Deicer and Anti-Icer Formulations and Relative Toxicity of Additive Package Ingredients Alkylphenol Ethoxylates and 4,5-Methyl-1H-Henzotriazoles. *Environmental Science & Technology.* 2006;40(23):17180996. https://doi.org/10.1021/es0603608
23. Corsi S.R., Geis S.W., Loyo-Rosales J.E., Rice C.P., Sheesley R.J., Failey G.G., et al. Characterization of Aircraft Deicer and Anti-Icer Components and Toxicity in Airport Snowbanks and Snowmelt Runoff. *Environmental Science & Technology.* 2006;40(10):16749681. https://doi.org/10.1021/es052028m
24. Шемякин А.В., Фадеев И.В., Успенский И.А., Юхин И.А., Чаткин М.Н. Состав для противокоррозионной обработки деталей резьбовых соединений. *Инженерные технологии и системы.* 2023;33(2):256–269. https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202302.256-269
25. Cancilla D.A., Baird J.C., Geis S.W., Corsi S.R. Studies of the Environmental Fate and Effect of Aircraft Deicing Fluids: Detection of 5-Methyl-1h-Benzotriazole in the Fathead Minnow (Pimephales Promelas). *Environmental Toxicology and Chemistry.* 2003;22:12503756. https://doi.org/10.1897/1551-5028(2003)022<0134:sotefa>2.0.co;2
26. Castro S., Erickson L.E., Davis L.C. Natural, Cost-Effective, and Sustainable Alternatives for Treatment of Aircraft Deicing Fluid Waste. *Environmental Progress.* 2005;24(1):26–33. https://doi.org/10.1002/ep.10059

Об авторах:

Фадеев Иван Васильевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технических дисциплин, Чувашского государственного педагогического университета имени И. Я. Яковлева (428003, Российская Федерация, г. Чебоксары, ул. К. Маркса, д. 38), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5863-1812, Researcher ID: B-8856-2019, ivan-fadeev-2012@mail.ru

Шемякин Александр Владимирович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры организации транспортных процессов и безопасности жизнедеятельности Рязанского государственного агротехнологического университета имени П. А. Костычева (390044, Российская Федерация, г. Рязань, ул. Костычева, д. 1), ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5019-258X, Researcher ID: AAC-8682-2022, avtodor-dec@mail.ru

Успенский Иван Алексеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технической эксплуатации транспорта Рязанского государственного агротехнологического университета имени П. А. Костычева (390044, Российская Федерация, г. Рязань, ул. Костычева, д. 1), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4343-0444, Researcher ID: B-7990-2019, ivan.uspensckij@yandex.ru

Чаткин Михаил Николаевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А. И. Лещанкина Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевистская, д. 68), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3758-7066, Researcher ID: O-7004-2018, chatkinm@yandex.ru

Юхин Иван Александрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автотракторной техники и теплоэнергетики Рязанского государственного агротехнологического университета имени П. А. Костычева (390044, Российская Федерация, г. Рязань, ул. Костычева, д. 1), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3822-0928, Researcher ID: Q-8188-2017, yuival@rambler.ru

Вклад авторов:

И. В. Фадеев – разработка методологии исследования; осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор данных.

А. В. Шемякин – контроль, лидерство и наставничество в процессе планирования и проведения исследования; формулирование замысла идеи исследования, целей и задач.

И. А. Успенский – разработка методологии исследования; осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор данных.

М. Н. Чаткин – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор данных.

И. А. Юхин – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила в редакцию 17.12.2024; поступила после рецензирования 09.02.2025; принята к публикации 24.02.2025

REFERENCES

1. Plakhotnikova M.A., Serebrenikova Yu.G., Lysyannikov A.V., Kaiser Yu.F. A Service Space for Aircraft De-Icing Fluid Treatment at the “Emelyanovo”Airport. *Izvestiya Tula State University*. *Technical sciences.* 2015;(5–2):106–113. (In Russ., abstract in Eng.) https://elibrary.ru/ulfazx
2. Kuryashov D.A., Bashkirtseva N.Y., Ovchinnikova Y.S., Mingazov R.R., Sladovskaya O.Y., Rahmatullin R.R. [Thickeners in the Compositions of Anti-Oxidizing Liquids]. *Herald of Technological University*. 2015;18(5):77–79. (In Russ.) https://elibrary.ru/touavp
3. Kashapova N.E., Bashkirtseva N.Y., Ovchinnikova Y.S., Sladovskaya O.Y., Mingazov R.R., Kuryashov D.A., et al. [The Effect of Glycols in the Composition of De-Icing Liquids on the Environment]. *Herald of Technological University*. 2015;18(5):209–212. (In Russ.) https://elibrary.ru/toubjl
4. Kashapova N.E., Bashkirtseva N.Y., Ovchinnikova Y.S., Sladovskaya O.Y., Mingazov R.R., Kuryashov D.A., et al. [Effect of Corrosion Inhibitors and Surfactants on the Toxicological Properties of Anti-Icing Fluids]. *Herald of Technological University.* 2015;18(5):221–223. (In Russ.) https://elibrary.ru/toubkp
5. Sladovskaya O.Y., Bashkirtseva N.Y., Ovchinnikova Y.S., Mingazov R.R., Kuryashov D.A., Rahmatullin R.R. [Corrosion Inhibitors in the Compositions of Anti-Icing Fluids]. *Herald of Technological University.* 2015;18(5):84–86. (In Russ.) https://elibrary.ru/touawt
6. Rumyantsev M.S., Savinova M.V., Kazantsev O.A., Kvashennikov A.I. Influence of Different Surfactants on Rheological Characteristics of Water-Glycol Solutions of Polyacrylic Thickeners. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Chemistry.* 2016;8(4):11–17. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.14529/chem160402
7. Mingazov R.R., Bashkirtseva N.Yu., Ovchinnikova Yu.S., Kuryashov D.A., Sladovskaya O.Yu., Rahmatullin R.R. [Surfactants in Anti-Icing Fluids]. *Herald of Technological University.* 2015;18(6):85–87. (In Russ.) https://elibrary.ru/tsxadb
8. Soltanov S.Kh. The Ecological Consequences from Applying of De-Icing and Anti-Icing Liquids “Octaflo Eg” and “Maxflight 04” in the Processing of Civil Aircrafts in Autumn-Winter Period. *International Research Journal.* 2016;(6–2):140–144. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.48.176
9. Breedveld G.D., Roseth R., Sparrevik M., Hartnik T., Hem L.J. Persistence of the De-Icing Additive Benzotriazole at an Abandoned Airport. *Water, Air, & Soil Pollution: Focus.* 2003;3:91–101. https://doi.org/10.1023/A:1023961213839

10. McNeill K.S., Cancilla D.A. Detection of Triazole Deicing Additives in Soil Samples from Airports with Low, Mid, and Large Volume Aircraft Deicing Activities. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology.* 2008;82:265–269 https://doi.org/10.1007/s00128-003-0063-8
11. Kiss A., Fries E. Occurrence of Benzotriazoles in the Rivers Main, Hengstbach, and Hegbach (Germany). *Environmental Science and Pollution Research.* 2009;16:702–710. https://doi.org/10.1007/s11356-009-0179-4
12. Fadeev I.V., Novoselov A.M., Sadetdinov Sh.V. The Amido-Borate Compounds Impact on the Corrosion and Corrosion Fatigue of Steel. *Privolzhsky Scientific Journal*. 2014;(3):31–35. (In Russ., abstract in Eng.) https://elibrary.ru/snzksz
13. Cancilla D.A., Holtkamp A., Matassa L., Fang X. Isolation and Characterization of Microtox®-Active Components from Aircraft Deicing/Antiicing Fluids. *Environmental Toxicology and Chemistry.* 1997;16(3):430–434. https://doi.org/10.1002/etc.5620160306
14. Castro S., Davis L.C., Erickson L.E. Plant-Enhanced Remediation of Glycol-Based Aircraft Deicing Fluids. *Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management.* 2001;5(3):141–152. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-025X(2001)5:3(141)
15. Byshov N.V., Polischuk S.D., Fadeev I.V., Sadetdinov Sh.V. Inhibitor of Metal Corrosion for Use During Repairing Automotive Equipment. *Izvestia of the Lower Volga Agro-University Complex*. 2019;(2):265–275. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.32786/2071-9485-2019-02-32
16. Bishov N.V., Fadeev I.V., Alexandrova G.A., Sadaddinov Sh.V. Improving Anti-Corrosive Properties Solutions of Synthetic Detergents for Mobile Equipment in Agriculture. *Izvestiya Mezhdunarodnoy Akademii Agrarnogo Obrazovaniya*. 2019;(45):20–24. (In Russ., abstract in Eng.) https://elibrary.ru/lywytc
17. Uspensky I.A., Fadeev I.V., Pestrjaeva L.Sh., Sadatdinov Sh.V., Kazarin A.S. New Corrosion Inhibitors for the Protection of Agricultural Machinery. *Izvestia of the Lower Volga Agro-University Complex*. 2020;(3):365–376. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.32786/2071-9485-2020-03-39
18. Corsi S.R., Harwell G.R., Geis S.W., Bergmann D. Impacts of Aircraft Deicer and Anti-Icer Runoff on Receiving Waters from Dallas/Fort Worth International Airport, Texas, USA. *Environmental Toxicology and Chemistry.* 2006;25(11):2890–2900. https://doi.org/10.1897/06-100R.1
19. Giger W., Schaffner C., Kohler H.-P. Benzotriazole and Tolyltriazole as Aquatic Contaminants. Input and Occurrence in Rivers and Lakes. *Environmental Science & Technology.* 2006;40(23):17180965. https://doi.org/10.1021/es061565j
20. Byshov N.V., Uspensky I.A., Alekseev V.V., Fadeev I.V. Changing the Contact Wetting Angles when Adding Surface-Active Substances to Washing Solutions. *Engineering Technologies and Systems.* 2019;29(2):295–305. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.295-305
21. Tetteh E., Loth E., Cummings J., Loebig J. Trends of Impact Ice Adhesion on Various Surfaces. *AIAA Journal.* 2021;59(5):1870–1874. https://doi.org/10.2514/1.J060034
22. Corsi S.R., Geis S.W., Loyo-Rosales J.E., Rice C.P. Aquatic Toxicity of Nine Aircraft Deicer and Anti-Icer Formulations and Relative Toxicity of Additive Package Ingredients Alkylphenol Ethoxylates and 4,5-Methyl-1H-Henzotriazoles. *Environmental Science & Technology.* 2006;40(23):17180996. https://doi.org/10.1021/es0603608
23. Corsi S.R., Geis S.W., Loyo-Rosales J.E., Rice C.P., Sheesley R.I., Failey G.G., et al. Characterization of Aircraft Deicer and Anti-Icer Components and Toxicity in Airport Snowbanks and Snowmelt Runoff. *Environmental Science & Technology.* 2006;40(10):16749681. https://doi.org/10.1021/es052028m
24. Shemyakin A.V., Fadeev I.V., Uspensky I.A., Yukhin I.A., Chatkin M.N. Composition for Anticorrosive Treatment of Parts of Threaded Connections. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(2):256–269. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202302.256-269
25. Cancilla D.A., Baird J.C., Geis S.W., Corsi S.R. Studies of the Environmental Fate and Effect of Aircraft Deicing Fluids: Detection of 5-Methyl-1h-Benzotriazole in the Fathead Minnow

(Pimephales Promelas). *Environmental Toxicology and Chemistry.* 2003;22:12503756. https://doi.org/10.1897/1551-5028(2003)022<0134:sotefa>2.0.co;2

26. Castro S., Erickson L.E., Davis L.C. Natural, Cost-Effective, and Sustainable Alternatives for Treatment of Aircraft Deicing Fluid Waste. *Environmental Progress.* 2005;24(1):26–33. https://doi.org/10.1002/ep.10059

About the authors:

Ivan V. Fadeev, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of Mechanical Engineering Chair, Chuvash State Pedagogical University named after I. Ya. Yakovlev (38 K. Marx St., Cheboksary 428003, Russian Federation), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5863-1812, Researcher ID: B-8856-2019, ivan-fadeev-2012@mail.ru

Alexander V. Shemyakin, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Organization of Transport Processes and Life Safety, Ryazan State Agrotechnological University named after P. A. Kostychev (1 Kostycheva St., Ryazan 390044, Russian Federation), ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5019-258X, Researcher ID: AAC-8682-2022, avtodor-dec@mail.ru

Ivan A. Uspensky, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of Technical Operation of Transport Chair, Ryazan State Agrotechnological University named after P. A. Kostychev (1 Kostycheva St., Ryazan 390044, Russian Federation), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4343-0444, Researcher ID: B-7990-2019, ivan.uspensckij@yandex.ru

Mikhail N. Chatkin, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Leshchankin Chair of Mobile Power Tools and Agricultural Machinery, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3758-7066, Researcher ID: O-7004-2018, chatkinm@yandex.ru

Ivan A. Yukhin, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Automotive and Tractor Engineering and Thermal Power Engineering, Ryazan State Agrotechnological University named after P. A. Kostychev (1 Kostycheva St., Ryazan 390044, Russian Federation), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3822-0928, Researcher ID: Q-8188-2017, yuival@rambler.ru

Contribution of the authors:

I. V. Fadeev – developing the study methodology; conducting the study, specifically performing the experiments, or collecting data.

A. V. Shemyakin – oversight and leadership responsibility for the research activity planning and executing, including mentorship external to the core team; formulating the study ideas, aims and objectives.

I. A. Uspensky – developing the study methodology; conducting the study, specifically performing the experiments, or collecting data.

M. N. Chatkin – conducting the study, specifically performing the experiments, or collecting data.

I. A. Yukhin – conducting the study, specifically performing the experiments, or collecting data.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 17.12.2024; revised 09.02.2025; accepted 24.02.2025

https://vestnik.mrsu.ru ISSN 2658-4123, eISSN 2658-6525

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ / ELECTRICAL TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT

https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202503.573-588
EDN: https://elibrary.ru/duhmjd
УДК 621.3
Оригинальная статья / Original article

Performance Studies of Photovoltaic Air Collector with Aluminum Foam Fins

M. Elmnifi[a,b]✉, **T. A. Duyun**[a]
[a] *Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation*
[b] *Bright Star University, Brega, Libya*
✉ *Monm.hamad@yahoo.co.uk*

Abstract

Introduction. Photovoltaic thermal collectors are a promising technology capable of generating electricity and recovering heat energy. However, the operating temperatures of photovoltaic cells are typically too high for efficient operation. One way to mitigate this problem is to use phase materials and conductive structures as an approach to improving thermal regulation and overall efficiency.
Aim of the Study. This paper aims to evaluate the suitability of aluminum foam fins and phase materials in improving the performance of an air-cooled photovoltaic collector and, more importantly, the impact of these materials on thermal and electrical yields. An aluminum foam frame was fabricated and placed on the back of a solar panel to serve as a heat dissipation medium.
Materials and Methods. To ensure consistency in experimental tests, experimental tests were conducted under both summer and winter operating conditions, and performance parameters were tested and compared with available studies to determine reliability.
Results. The results revealed that the overall performance of the photovoltaic thermal collector ranged from 43.07 to 50.35% in summer and from 47.94 to 51.53% in winter. These results demonstrate that the incorporation of aluminum foam fins has a significant impact on thermal management and energy conversion efficiency compared to conventional photovoltaic thermal systems.
Discussion and Conclusion. In summary, this study demonstrates that photovoltaic thermal air collectors with phased materials represent a practical and effective approach to renewable energy practices, offering improved operational stability and increased energy production. The study also demonstrates the potential of hybrid photovoltaic thermal systems as a platform for sustainable energy development.

Keywords: photovoltaic thermal collector, diverse climate, energy efficiency, renewable solution

Acknowledgments: The authors are grateful to the anonymous reviewers whose objective comments contributed to the quality of the article.

© Elmnifi M., Duyun T. A., 2025

Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

For citation: Elmnifi M., Duyun T.A. Performance Studies of Photovoltaic Air Collector with Aluminum Foam Fins. *Engineering Technologies and Systems.* 2025;35(3):573–588. https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202503.573-588

Исследование эксплуатационных характеристик фотоэлектрического воздухосборника с ребрами из пеноалюминия

М. Элмнифи[1,2]✉, **Т. А. Дуюн**[1]
[1] *Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, г. Белгород, Российская Федерация*
[2] *Университет Bright Star г. Брега, Ливия*
✉ *Monm.hamad@yahoo.co.uk*

Аннотация

Введение. Фотоэлектрические тепловые коллекторы являются перспективной технологией, способной генерировать электроэнергию и рекуперировать тепловую энергию. Однако, как правило, рабочие температуры фотоэлектрических элементов слишком высоки для эффективной работы. Одним из способов решения этой проблемы является использование фазовых материалов и проводящих структур для улучшения терморегулирования и повышения эффективности.
Цель исследования. Целью данной работы является оценка использования ребер из пеноалюминия и фазных материалов для улучшения характеристик фотоэлектрического коллектора с воздушным охлаждением и, что более важно, влияния этих материалов на выход тепла и электричества. Для отвода тепла изготовлен каркас из пеноалюминия, который был размещен на задней части солнечной панели.
Материалы и методы. Испытания проводились как в летних, так и в зимних условиях эксплуатации. Также были проверены рабочие параметры и проведено сравнение с уже имеющимися данными исследований.
Результаты исследования. Результаты показали, что общая производительность фотоэлектрического теплового коллектора варьировалась от 43,07 до 50,35 % летом и от 47,94 до 51,53 % зимой. Эти результаты демонстрируют, что использование ребер из пеноалюминия оказывает значительное влияние на управление температурой и эффективность преобразования энергии по сравнению с обычными фотоэлектрическими тепловыми системами.
Обсуждение и заключение. Данное исследование показывает, что фотоэлектрические тепловоздушные коллекторы с фазированными материалами представляют собой практичный и эффективный подход к использованию возобновляемых источников энергии, обеспечивающий повышенную стабильность работы и увеличение выработки энергии. Исследование также демонстрирует потенциал гибридных фотоэлектрических тепловых систем как платформы для устойчивого развития энергетики.

Ключевые слова: фотоэлектрический тепловой коллектор, разнообразный климат, энергоэффективность, возобновляемые источники энергии

Благодарности: авторы благодарны анонимным рецензентам, объективные замечания которых способствовали повышению качества статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Элмнифи М., Дуюн Т.А. Исследование эксплуатационных характеристик фотоэлектрического воздухосборника с ребрами из пеноалюминия. *Инженерные технологии и системы.* 2025;35(3):573–588. https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202503.573-588

INTRODUCTION

Solar modules can be cooled using passive heat transfer via phase exchange materials (PCM). By PCM is included in the back floor of the solar module, it absorbs excess heat from the photovoltaic (PV) in the shape of latent heat, helping to maintain the favored surface temperature for a certain period. The heat of the PV is transferred to the PCM by conduction, and this manner can be advanced and highly regulated by using radial designs. To deal with the problem of low thermal of PCM, the use of composite PCM is a superb method. In addition, a new approach to the usage of two types of PCM at the same time can be implemented to enhance thermal regulation, resulting in better overall performance in the year [1].

PV technology has played a pivotal role in the global transition to renewable energy, driven by rapid developments in PV technology. However, high operating temperatures, and the resulting reduced conversion efficiency and long-term performance, are among the most significant limitations on solar module performance. The electrical efficiency of a PV module can decrease by 0.4–0.5°C for every degree Celsius increase in its surface temperature. Therefore, appropriate cooling mechanisms are essential to improve the overall efficiency and sustainability of PV systems.

PCM have proven to be an interesting option among passive cooling methods. PCM absorb thermal energy as latent heat when incorporated on the backside of PV modules during their phase transition. This absorption helps maintain the module surface temperature at the desired level for a relatively long period, enhancing energy production. Heat transfer between photovoltaic modules and PCM relies on conduction. This process can be improved through specific structural designs, such as radial geometries or fins, which increase the effective heat transfer area. However, one of the main drawbacks of conventional PCM is their low thermal conductivity, which limits their cooling capacity. To overcome this problem, researchers have proposed the use of composite PCMs, in which additives such as graphite, metal foams, or nanoparticles are added to enhance thermal conductivity and accelerate the material's charge/discharge cycles. Furthermore, a more advanced approach involves the simultaneous use of two PCM with different melting points [2]. This will enable good thermal control across different seasons, ensuring better results year-round by extending the PV module's operating temperature. Overall, incorporating PCM, particularly in composite or dual- PCM designs, provides an economical and sustainable way to improve the performance of photovoltaic systems. This approach improves electrical performance and is part of thermal energy recovery, which increases energy consumption in photovoltaic thermal (PVT) systems.

LITERATURE REVIEW

Many scientists have explored ways to reduce the temperature of PV modules to enhance their electrical efficiency and overall functionality. Passive cooling methods, particularly PCM, have received extensive research due to their ability

to absorb excess heat as latent heat during the melting process. However, the main weakness of conventional PCM is their poor thermal conductivity, which slows down heat transfer. To overcome this obstacle, several studies have proposed adding composite PCM to additional materials such as graphite, nanoparticles, or metal foams to enhance thermal conductivity and provide effective cooling. Furthermore, researchers have also investigated the application of aluminum foam structures and fin geometries within the PCM layer, providing superior thermal dissipation and consistent temperature regulation behind PV panels. Other researchers have recommended the use of dual or cascaded PCM with varying melting points to maintain the cooling effect for a longer period and across seasons. These developments have proven to improve the thermal and electrical efficiency of PV systems, particularly in air-cooled collectors. Overall, studies show that PCM-based cooling, especially when used with conductive materials and comprehensive designs, is effective in maintaining PV temperature and performance, enabling the integration of PVT systems into renewable energy systems.

Scientists [3] looked at the impact on the thermal management of the PCM system with fins with different spacing from 0.4 to 33 mm. The fins created better convection circulation within the PCM (RT27), and as the number of fins increased, the time to melt the PCM fully was reduced. Maximum reduction of temperature by 10°C in the PV panel occurred with 4 mm of fin spacing because of better interaction between the metal surface and PCM.

In the study [4], there was investigated the performance of system in an experimental process in Al-Ain. In novel days, the reference PV panel was orientated at a temperature of 58°C, whereas the finned PCM version achieved only 47°C at the maximum. The highest temperature differences found were those on the sunny days, 11°C, and on cloudy days, 5°C. In the study[1] employing capric-palmitic acid (PCM1) and $CaCl_2.6H_2O$ (PCM2), there was also studied the thermal performance of modules incorporating internally finned PCM where the climatic parameters of Dublin and Vehari were taken into consideration. In Dublin, the maximum decrease of PV temperature was attained with PCM1 to 43°C and PCM2 to 40°C. The temperatures in Vehari were reduced from 63°C to 51°C and 42°C, respectively. The outcomes of the evaluations showed that the share of cost of material and setup for PCM systems.

The paper describes [5] the performance comparison of PCM incorporated right into the vertical fins in the backside of the panel in a test in Al-Ain. During the daytime, the PCM was decreasing the temperature by 22.6°C, increasing the power 7.2% with the help of its latent heat. The fins solved the problem of the thermo physical parameter of the acetum, in particular, the low conductivity of PCM. While comparing PCM systems in both the cooler climate of Dublin and the warm climate of Vehari.

Scientists [6] have explained a similar study. To enhance thermal storage for these PCM, they employed plasmatic acid (PCM1) and $CaCl_2.6H_2O$ (PCM2) with

[1] Hassan A., Nouman H., Assi A., Norton B. Temperature Regulation and Thermal Energy Storage Potential of Phase Change Materials Layer Contained at the Back of a Building Integrated Photovoltaic Panel // 30th International PLEA Conference: Sustainable Habitat for Developing Societies: Choosing the Way Forward – Proceedings. 2014. Vol. 2. p. 139–145. Available at: https://clck.ru/3P9kY4 (accessed 21.10.2024).

incorporated fins. PCM2 was shown to give better cooling to PV than PCM1 because of its better thermo physical properties. In Dublin, the power savings achieved were 4% and 11.3% for PCM1 and PCM2, respectively, while in Vehari the power savings included 5.1% for PCM1 and 13% for PCM2.

The authors of the study [7] demonstrated the effectiveness of fins within PCM in power output and efficiency by testing four different configurations of PV: Part of it was bare, and part of it had 3, 6, and 12 fins. The maximum temperature reduction achieved in the present study is 15°C in the PCM system with 12 fins, resulting in enhancing the PV efficiency by 5.39%. This was because of increased interaction between the PCM and the metal surface, which increased the rate at which the PCM melts.

The authors [8] assessed the performance of a Nan fluid concentrating PV thermal (CPV-T) system with PCM heat sinks. Cooling methods were investigated for a warm climate: different configurations of PCM with water and/or Nan fluid circulation with or without the integration of PCM. Based on the results, the highest cooling capability was identified for PCM utilizing Nan fluid circulation and PCM. The same configuration enabled an improvement of the electrical efficiency to 17.02% and thermal efficiency to 61.25%. Furthermore, it lowered the temperature of the PV module to about 26.6°C below that of typical CPV systems. The average size of the system output power was 20.18 W with a difference of nearly 4 W from the single CPV systems.

Scientists [9] conducted the study focusing on the improvement of traditional PCM heat sink designs for the thermal management of PV panels. The study defined new heat sinks to counter problems highlighted in research literature; these include increased thermal control durations, lower temperatures, and better discharge through passive dissipation using PCM and air. The investigation included five cases: the reference case (PV), the second case (PV-PCM without open pipes), and three newly designed cases with different numbers of open pipes incorporated on PCM layer, having 6, 10, & 14 pipes, respectively, and termed as cases 3, 4, and 5. The work involves experiments on PV panels setting with an irradiation density of 1 000 W/m², and temperature ambient set at 25°C, at different angles of 30°, 45°, and 90°. This was not surprising, and the results indicated that the incorporation of open pipes enhanced passive heat removal by PCM. The results finding a 45% increase in the thermal regulation period, a maximum PV temperature reduced to 11°C, a 36.5% reduction in solidification times, and a 4.37% increase in the overall electrical output during the 7-hour irradiation hours.

In the study [10] there was used copper metal foam fins incorporated in a passive cooling technique to improve the performance PV panels under experimental research. This study was conducted in Baghdad city, Iraq, in 2019. Three PV panels were tested: one of the assemblies was modified to incorporate the cooling technique described in this thesis, and two were left intact for comparative analysis. The study focused on four configurations of longitudinal fins: 4, 6, 8, and 10 fins. The findings thus showed that increasing the number of longitudinal by ten led to a drop of the average temperature about 8.4% while the power output rose by of 4.9%. The metal foam ensured air was let in to flow through the fins, thus increasing heat elimination from the PV panel.

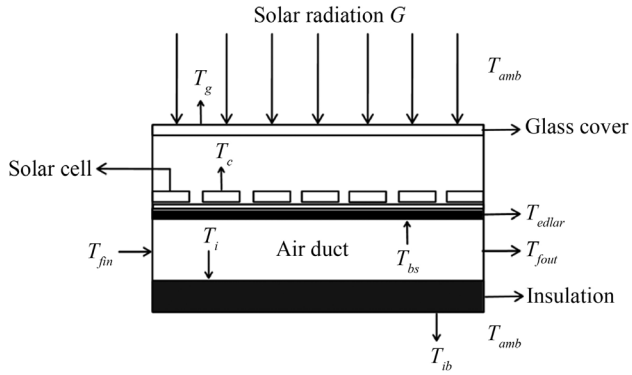
The authors [11] conducted an experimental study on the thermal characteristics of a single solar air collector integrated with high porosity metal foams. This work was aimed at examining the influence of putting into operation the multi-flow system (MF) on the performance air collectors under the climatic of Al Ramadi, Iraq. The experiments also show that the configuration with the angle of incidence of MF at 45 degrees 45° yields the highest value of thermal efficiency of 94.8%. Subsequent to it was the MF configuration at 0° inclination (62.6%) and then the PV configuration (33.8%). Moreover, for the 45° layout, enhanced turbulent intensity increases the velocity gradients to mix cold and hot air and thus creates a bigger contrast in air temperature compared to other layouts. Hence, this study has illustrated the practicality of the ability to use high-porosity metal foams in an improvement of the solar collector performance.

The research approach combines experimental laboratory work with MATLAB modeling to improve PVT panels uniquely using aluminum foam fins. This study combines the extended heat transfer surfaces with the advantages of the foam's porous structure, creating an integrated thermal solution that previous studies have not considered together. However, this study presents a dual-use hybrid system that meets the thermal and electrical requirements of industrial applications. The use of aluminum fins is superior to copper fins, despite the better thermal performance of copper (400 W/m.K) compared to aluminum (210 W/m.K), for three main reasons: practical, engineering, and economic limitations. Switching to aluminum over copper offers a more economical choice that allows industries to increase the adoption of the system without economic limitations [12; 13]. Aluminum provides better structural efficiency due to its lower density, despite its lower price than copper. This makes it ideal for thermal systems, as it does not require additional structural loads. The advantage of aluminum foam is its excellent strength and corrosion resistance, as it can withstand the effects of the external environment, especially in oil facilities. The porous structure of aluminum foam creates large surfaces that increase the availability of convective heat exchange, despite its lower thermal conductivity compared to copper.

MATERIALS AND METHODS

Photovoltaic thermal air collector for space heating

A schematic representation of the PVT collector is shown in Figure 1. It is made up of identical mono crystalline PV modules. The modules are thermally connected in series and electrically in parallel. A solar energy is transformed into thermal and electrical energy when it strikes the solar PV cell within the module. The battery stores the electrical energy, and the air blower beneath the PV module extracts the thermal energy that is present at its back surface. PV modules heat up because of the thermal energy, which has an impact on electrical efficiency. The PV panel's heat must be removed to achieve optimum electrical efficiency. The photovoltaic thermal air collector has input design parameters are given [14].



F i g. 1. Schematic cross-sectional diagram of photovoltaic thermal air collector [14]

Source: hereinafter in this article the diagrams are compiled by the authors of the article.

Mathematical model

Since we want to keep this section relatively short, we have not included the mathematical formulas for the thermal and electrical assessment of the PVT collector. Please look at the references for more information[2] [14; 15]:

Thermal efficiency:

$$\eta_{th} = \frac{Q_u}{GA}; \tag{1}$$

Electrical efficiency:

$$\eta_{ele} = \frac{V_{mp} I_{mp}}{A_m G}; \tag{2}$$

Overall thermal efficiency:

$$\eta_{all} = \eta_{th} + \frac{\eta_{ele}}{C_f}, \tag{3}$$

where Q_u – the useful energy rate; G – solar radiation; A – area of the collector; V_{mp} – voltage; I_{mp} – current; C_f – plant conversion factor, taken as 0.36 [16; 17].

Computer simulation

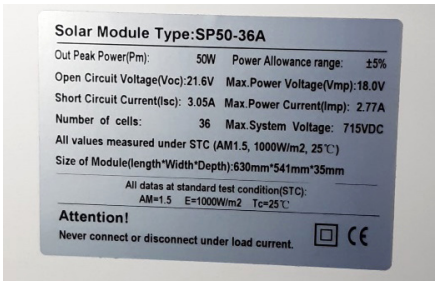
In PVT, air collectors, thermal and electrical parameters are interdependent, requiring initial temperature guesses to calculate heat transfer coefficients and electrical efficiency accurately. Consequently, an iterative method is used to determine thermal performance parameters such as overall heat loss coefficient, efficiency factor, flow factor, and heat removal factor. The five parameters of the electrical model are determined using implicit equations, as outlined in the Electrical Model section. To input the PVT air collector's design parameters and operating settings, a computer program was created

[2] Duffie J. A., Beckman W. A. Solar Engineering of Thermal Processes. Hoboken : John Wiley & Sons, Inc., 2006. 908 p. Available at: https://www.mechfamily-ju.com/storage/images/files/file_1731558700SHla9.pdf (accessed 21.10.2024).

in MATLAB (2020) [18]. These operating conditions include the time of day, inlet air temperature, hourly solar irradiance, relative humidity, dew point temperature, velocity of air inside the duct, and wind velocity over the glass surface.

Experimental design

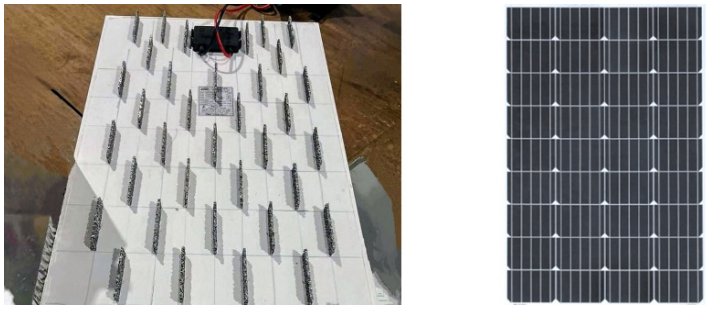
The design was performed on the roof of the location in AL-Marj, Libya. Field activities were carried out under the climatic factors of AL-Marj, which is at approximately 32.45° North latitude and 20.80° East longitudinal coordinates in March 2024. Three PV modules were utilized: two were fitted with continuously extending Dimensions foam fins (5×5×10 mm) for cooling while the third was left naked to evaluate the impact comparatively of cooling. The parameters of each panel were width, 67 centimeters; length, 54 centimeters; maximum output power, 50W. More details concerning specifications for the modules are provided below in the Figure 2.



F i g. 2. Specifications for the modules

The aluminum-mounting framework was used to install the two PV panels, and as a result, the system could tilt from 0 degrees to 90 degrees. The track was turned towards the south at an angle based on what worked for AL-Marj, Libya, during a particular month, to take advantage of solar energy. The optimal values for the tilt of the axis work out to 45° for February 35° for March, and 25° for April. Each PV panel was installed so that it would receive the most sunlight.

The PV panels were fitted with 5 cm high open-cell aluminum foam fins with a porosity of 0.9. When these fins were fixed for back of the panels, air gaps between them were eliminated. Because of the thermal grease, there was efficient heat transfer between the panels and the fins. You can see an open-cell metal foam in Figure 3.



F i g. 3. Photovoltaic panels and aluminum foam fins

Several variations were included in the experiments, such as back and front surface temperatures of the PV panels, solar radiation, maximum power, current, voltage, ambient temperature, and wind speed. The data was collected every hour. Nearly 15 cm above the PV panels, a measuring instrument showed the speed of the wind. Eight K-type thermocouples were connected and used to measure the temperature in the panel. There were six TCs on the back for panel and other TCs on its surface. Another thermocouple was attached 15 cm beneath for panel to note the temperature under shaded conditions. The switches made it possible to connect the thermocouples to the Pico data logger, which has eight channels to receive this data. The data saved by the data logger was sent to a PC by connecting the computer. A Solar Survey record radiation intensity and set the ideal position for the PV panels by providing its tilt and direction using the instrument's meter and compass. The meter for solar irradiance was placed horizontally next for the PV modules. Additionally, the results for I_{sc}, V_{oc}, and Pm were found by using the Solar Module Analyzer PV200 in conjunction with the created I–V curves. The following Figure 4 explains and shows the instruments that work with PV panels.



F i g. 4. Experimental equipment and devices

RESULTS

The impact of aluminum foam fins on the efficiency and operational temperature of photovoltaic panels was investigated by the present experimental analysis. The panel with no fins on the backside, reference board, and test board with fins on the backside. Figure 5 also shows the average back surface temperature difference between Panels. The temperature reductions achieved with the configuration with ten fins were 4.20°C to 2.4°C. In this analysis, it is agreed that an improvement of fins results in an increase in the decrease of panel temperature. Namely, the increase in density of the fins encourages the required velocity of airflow below the PV panel. In addition, the fin structure enables air to be drawn from beneath the PV panel in a number of directions rather than via solid fins, as observed from other research. Therefore, heat transfer through natural convection is significantly enhanced from the PV panel. Furthermore, it is important for all cases that the omnibus test of the power difference between Panels is shown in Figure 6. The highest power difference was measured for the ten-fin arrangement, estimated to be 3.99%. This results in an increase in power, and the increase is related

to a fins. It further shows that incorporating aluminum foam fins yields a vast increase in the dissipation of heat and electrical efficiency of PV panels.

Figure 5 shows the power voltage (P–V) characteristic of a solar power system under various levels of solar radiation intensity. This graph illustrates the dependency of power output (vertical axis) on voltage (horizontal axis) with variable solar radiation measured (400 to 1 200 W/m²). The curves depict the level of solar radiation impacts on their system capacity. It was noted that both the radiation factors heightened with increasing radiation and the power output increased with the increasing radiation. This effect indicates that solar radiation is the central determinant in the performance of solar power systems.

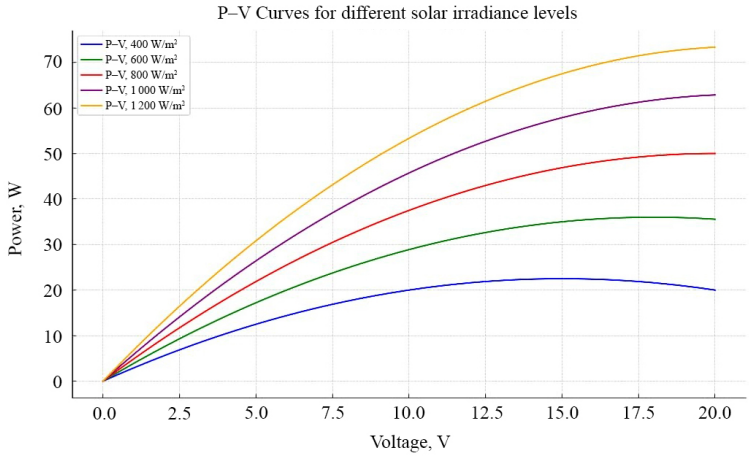
Figure 6 shows I–V characteristics of the solar power system, which illustrates the effect of solar irradiation varying between (400 to 1 200 W/m²). an findings demonstrate that as the voltage increases, the current is reduced, which in solar cells is an anticipated attribute; the maximum current density of the cell is lighter at a higher irradiation intensity level. This emphasizes the need to enhance engineering designs for the systems to improve the efficiency of the power produced from the systems, as revealed by the curves of the solar irradiance. This paper establishes that knowing how these solar systems behave when installed can help improve their efficiency and effectiveness as renewable energy sources.

Figure 7 shows the result in temperature variation for the with and without cooling conditions over 10 hours. This data indicates that the temperature increases, but the rates are moderate in the case with cooling as compared to the one without cooling; the temperature cases in the latter reach over 55°C. These observations are an indication of the ability of the cooling system to keep the temperature at a low level, which was applicable by underpinning the need to apply cooling techniques to enhance performance in several applications.

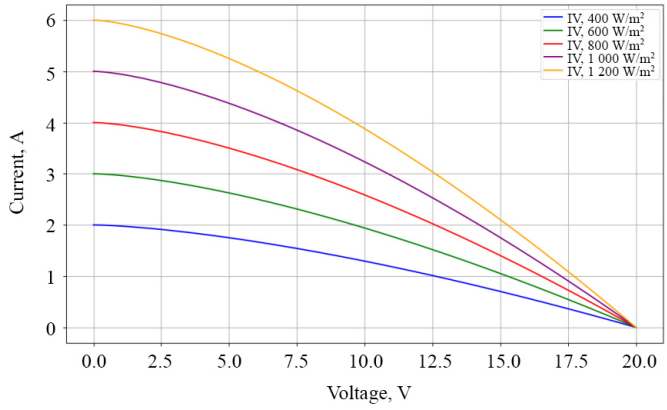
Figure 8 compares the wind speed with the cooling efficiency, where it can be seen that the cooling efficiency increases as the wind speeds increase. The cooling efficiency ranges between 5% at 0.5 m/s and 25% at 3 m/s. All these outcomes show the correlation between the wind speed and the efficiency of the cooling systems, thus suggesting the appropriate wind conditions can ramp up the performance of cooling solutions.

Figure 9 shows the results expressed in percent are presented in an inverse correlation between temperature difference and electrical energy efficiency, with the efficiency decreasing from about 12.5% at a temperature 10°C to about 10% at a temperature 60°C. The obtained data show that the efficiency of electrical systems decreases with rising temperatures, and thus it is essential to conform to temperature differences to improve performance.

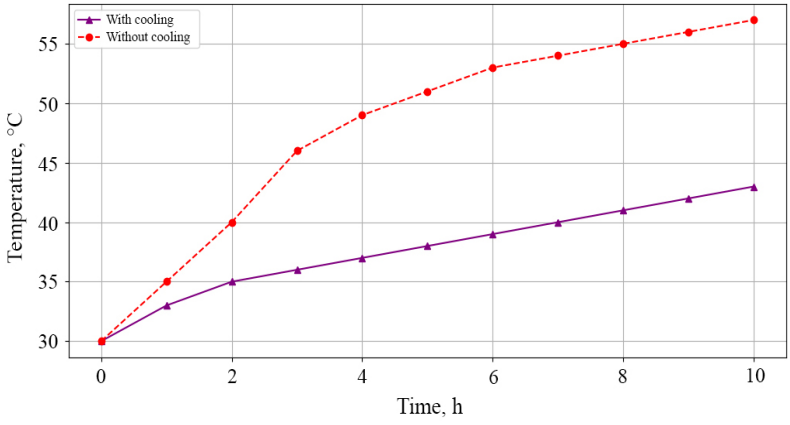
Figure 10 shows a comparison of the power output of solar modules under various cooling technologies. The standard module (blue) can generate approximately 15 W at 400 W/m² and 30 W at 1 200 W/m². The module with overlap blades (green) generates 20 W at 400 W/m² and 35 W at 1 200 W/m². The longitudinal blades (red) produce 18 W and 34 W at 1 200 W/m² respectively. These results suggest that cooling technologies improve the practicability of power generation utilizing solar irradiance, especially at higher intensities.



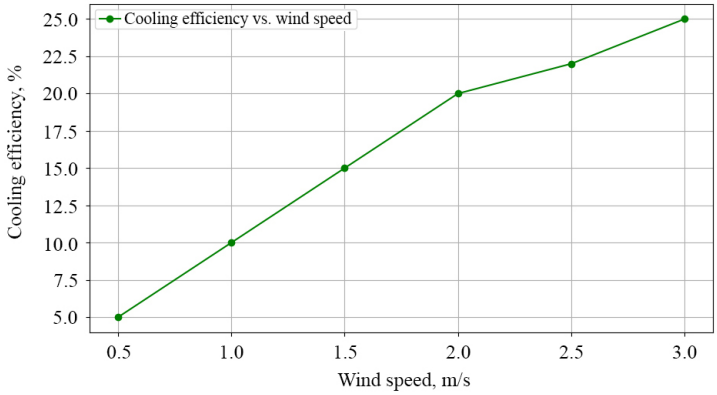
F i g. 5. Shows the power voltage (P–V)



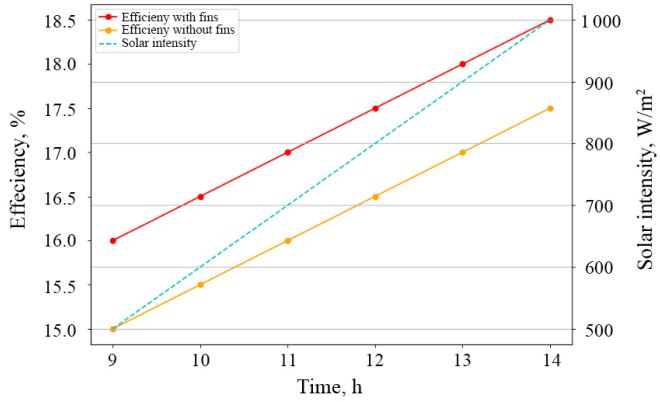
F i g. 6. Shows I–V characteristics of the solar power system



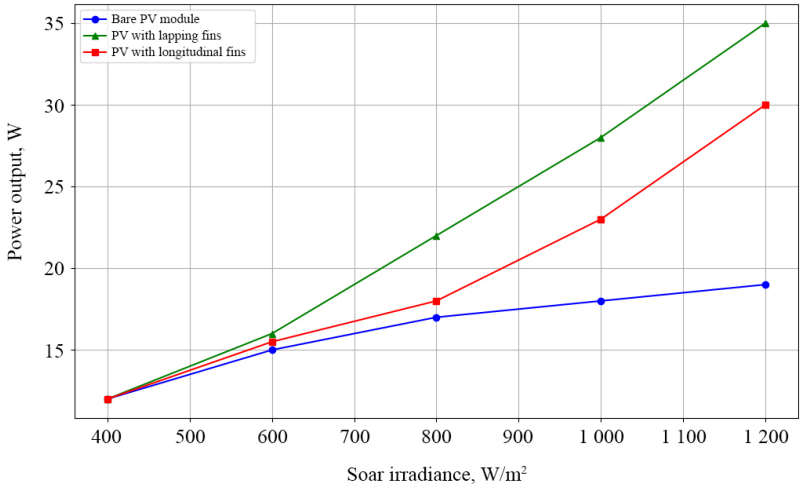
F i g. 7. Shows the result in temperature variation for the with and without cooling



F i g. 8. Compares the wind speed with the cooling efficiency

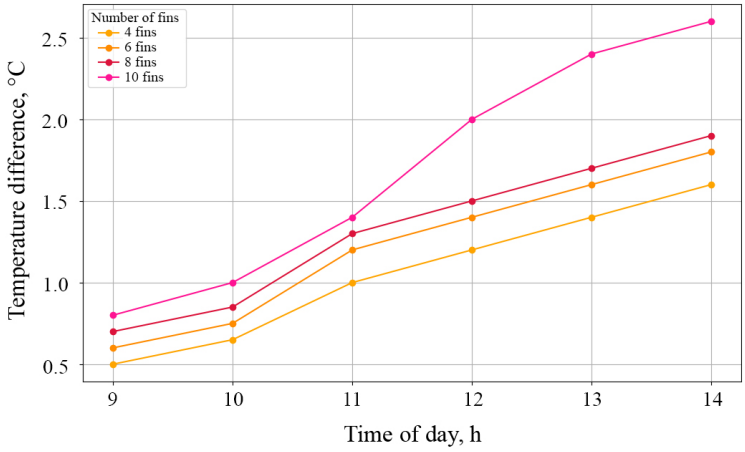


F i g. 9. Temperature difference and electrical energy efficiency



F i g. 10. Shows a comparison of the power output of solar modules under various cooling technologies

Figure 11 shows the thermal performance of using aluminum foam fins, where the temperature difference has been plotted time. This established that as the number of fins in the panel increases, the temperature difference also increases. It takes 14 hours to record temperature. The four-fins set with yellow color has a temperature increase of about 0.5 to 1.5°C as compared with the initial temperature. The six-fins set with orange color reach a maximum of 1.5°C. The 10-fins set with pink color has a temperature difference of more than 2.5°C the results show that the maximum number of fins improves the cooling effect of the system.

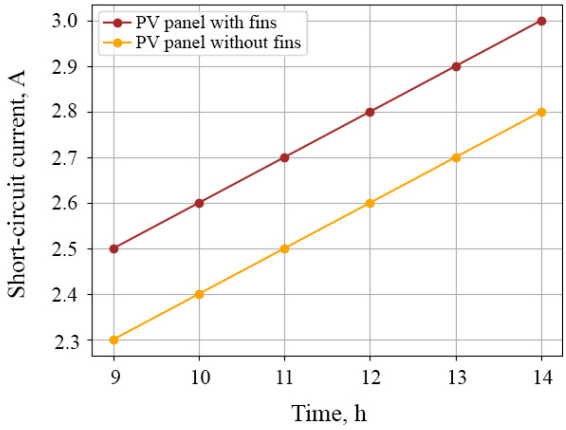


F i g. 11. Shows the thermal performance of using number of fins

Solar insolation, electrical efficiency drops slightly, ranging from 10.24 to 11.71%. The overall efficiency is below 50%. However, in winter, PVT collector show good efficiency thermal, which reaches a maximum of 22.46%, and stable electrical efficiency of around 11.40%. The overall efficiency of PVT collector ranges from 31.93 to 54.10%.

The PVT air collector's overall efficiency, which ranges from 39.27 to 47.87%, is lowered during summer months since its thermal electrical efficiency ranges from 10.22 to 11.92%. However, the temperature differential between the input and outlet is low in the winter. Good overall efficiency is found in the range of 44.80 to 51.09%, with thermal efficiency ranging from 10.17 to 17.60% and higher electrical efficiency spanning from 11.86 to 12.46%.

Figure 12 shows represents the changes in Open circuit current on panels with and without cooling fins from 9:00 AM and 2:00 PM. Data indicates that the current is gradually rising in both cells because the solar intensity increases during the day. For the upcoming hour, the current was found to be 2.5 amps for the finned panel and 2.3 amps for the finless panel. When the time 2:00 PM, 3.0 amps of current were passing through the finned panel, whereas 2.8 amps passed through the finless panel. Because the current kept going down from panel to panel, we can conclude that cooling fins make heat dissipate better, cool down the panel, and improve its performance while using electricity. Therefore, the use of cooling adds 7–9% more power from the PV cell in the afternoon compared to an uncooled panel.



F i g. 12. Shows Open circuit current

DISCUSSION AND CONCLUSION

In the experiment, aluminum foam was added to photovoltaic panels to improve their cooling and efficiency. The aluminum foam layer acted as the cooler and glued the photovoltaic module to the other components using an adhesive designed for heat transfer. The layer was added to lower the temperature on the panels as warm air could cause solar cell efficiencies to drop. During the experiment, four types of fins were tested to see how they affected the temperature and electricity output of the panel. Since the fins are found where air is plentiful, they can quickly transmit heat into the air. Using 10 fins on the backside of the panel resulted in a drop in temperature of 9%, compared to the control group. By reducing the temperature, the semiconductor will function better and solar cells will lose less heat, resulting in a higher open-circuit voltage. When airflows were medium to strong, the technique made use of this to increase the rate at which fins were cooled by convection.

REFERENCES

1. Al-Karboly A.M., Ibrahim A., Fazlizan A., Sopian K., Al-Aasam A.B., Bin Ishak M.A.A., et al. Experimental Evaluation of a Photovoltaic Thermal Collector Using Twisted Tape Absorber with Nano-Enhanced Phase Change Material for Thermal Storage. *Journal of Energy Storage*. 2025;109:115122. https://doi.org/10.1016/j.est.2024.115122
2. Majdi H.S., Younis A., Abdullah A.R., Elmnifi M., Habeeb L.J. A Comparative Analysis of the Efficiency of Monocrystalline and Polycrystalline Photovoltaic Modules: CTI-80 and YHM-205-27P. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics.* 2023;18(4):775–782. https://doi.org/10.18280/ijdne.180403
3. Huang M.J., Eames P.C., Norton B., Hewitt N.J. Natural Convection in an Internally Finned Phase Change Material Heat Sink for the Thermal Management of Photovoltaic. *Solar Energy Materials and Solar Cells.* 2011;95(7):1598–1603. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.01.008
4. Alsaqoor S., Alqatamin A., Alahmer A., Nan Z., Al-Husban Y., Jouhara H. The Impact of Phase Change Material on Photovoltaic Thermal (PVT) Systems: A Numerical Study. *International Journal of Thermofluids*. 2023;18:100365. https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100365

5. Hasan A., Alnoman H., Rashid Y. Impact of Integrated Photovoltaic-Phase Change Material System on Building Energy Efficiency in Hot Climate. *Energy and Buildings.* 2015;130:495–505. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.059
6. Hasan A., McCormack S.J., Huang M.J., Sarwar J., Norton B. Increased Photovoltaic Performance Through Temperature Regulation by Phase Change Materials: Materials Comparison in Different Climates. *Solar Energy.* 2015;115:264–276. https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.02.003
7. Tan L., Date A., Fernandes G., Singh B., Ganguly S. Efficiency Gains of Photovoltaic System Using Latent Heat Thermal Energy Storage. *Energy Procedia.* 2017;110:83–88. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.110
8. Kouravand A., Kasaeian A., Pourfayaz F., Rad M.A.V. Evaluation of a Nanofluid-Based Concentrating Photovoltaic Thermal System Integrated with Finned PCM Heatsink: An Experimental Study. *Renewable Energy*. 2022;201(1):1010–1025. https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.11.025
9. Yagci O.K., Avci M., Aydin O., Markal B. An Experimental Study on the Performance of PCM-Based Heat Sink with Air for Thermal Regulation of PVs. *Solar Energy.* 2024;278:112800. https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112800
10. Hasan D.J., Farhan A. Enhancing the Efficiency of Photovoltaic Panel Using Open-Cell Copper Metal Foam Fins. *International Journal of Renewable Energy Research.* 2019;9(4):1849–1855. Available at: https://www.researchgate.net/publication/338388161_Enhancing_the_Efficiency_of_Photovoltaic_Panel_Using_Open-Cell_Copper_Metal_Foam_Fins (accessed 01.06.2025).
11. Mutar W.M., Alaiwi Y. Experimental Investigation of Thermal Performance of Single Pass Solar Collector Using High Porosity Metal Foams. *Case Studies in Thermal Engineering.* 2023;45:102879. https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102879
12. Abbasov H.F. The Effective Thermal Conductivity of Composite Phase Change Materials with Open-Cellular Metal Foams. *Int J Thermophys.* 2020;41:164. https://doi.org/10.1007/s10765-020-02747-z
13. Madgule M., Sreenivasa C.G., Borgaonkar A.V. Aluminum Metal Foam Production Methods, Properties and Applications-a Review. *Materialstoday: Proceedings.* 2023;77(3):673–679. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.11.287
14. Amori K.E., Al-Najjar H.M.T. Analysis of Thermal and Electrical Performance of a Hybrid (PV/T) Air Based Solar Collector for Iraq. *Applied Energy.* 2012;98:384–395. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.03.061
15. Wang.G, Zhao K., Shi J., Chen W., Zhang H., Yang X., et al. An Iterative Approach for Modelling Photovoltaic Modules without Implicit Equations. *Applied Energy.* 2017;202:189–198. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.149
16. Joshi A.S., Tiwari A., Tiwari G.N., Dincer I., Reddy B.V. Performance Evaluation of a Hybrid Photovoltaic Thermal (PV/T) (Glass-to-Glass) System. *International Journal of Thermal Sciences.* 2009;48(1):154–164. https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2008.05.001
17. Elmnifi M., Mansur A.N., Hassan A.K., Abdullah A.R., Ayed S.K., Majdi H.S., et al. Experimental and Simulation Study for Improving the Solar Cell Efficiency by Using Aluminum Heat Sinks. *Proceedings on Engineering Sciences.* 2024;6(1):161–170. https://doi.org/10.24874/PES06.01.018
18. Ayed S.K., Elmnifi M., Moria H., Habeeb L. Economic and Technical Feasibility Analysis of Hybrid Renewable Energy (PV/Wind) Grid-Connected in Libya for Different Locations. *International Journal of Mechanical Engineering*. 2022;7(1):930–943. Available at: https://clck.ru/3P9Jf7 (accessed 01.06.2025).

About the authors:

Monaem Elmnifi, Postgraduate Student in Department of Mechanical Engineering Technology, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov (46 Kostyukova St., Belgorod 308012, Russian Federation), Lecturer, Bright Star University (Coastal Road St., Brega 00218, Libya), ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4074-1877, Scopus ID: 57218518354, Monm.hamad@yahoo.co.uk

Tatyana A. Duyun, Dr.Sci. (Eng.), Head of Department of Mechanical Engineering Technology, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov (46 Kostyukova St., Belgorod 308012, Russian Federation), ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8407-0628, Researcher ID: B-5376-2016, Scopus ID: 6504101719, tanduun@mail.ru

Authors contribution:

M. Elmnifi – formulation of the research concept; developing or designing methodology; conducting the study, specifically performing the experiments or collecting the data; preparing and presenting the manuscript, specifically visualizing and presenting data.

T. A. Duyun – formulating the study aims and objectives; conducting the study, specifically performing the experiments or collecting the data; preparing and presenting the manuscript, specifically writing the initial draft.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 03.03.2025; revised 16.05.2025; accepted 04.06.2025

Об авторах:

Элмнифи Монаем, аспирант кафедры технологий машиностроения Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова (308012, Российская Федерация, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46), преподаватель университета Bright Star (00218, Ливия, Брега, ул. Прибрежная дорога), ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4074-1877, Scopus ID: 57218518354, Monm.hamad@yahoo.co.uk

Дуюн Татьяна Александровна, доктор технических наук, заведующая кафедрой технологий машиностроения Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова (308012, Российская Федерация, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46), ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8407-0628, Researcher ID: B-5376-2016, Scopus ID: 6504101719, tanduun@mail.ru

Вклад авторов:

М. Элмнифи – формулирование концепции исследования; разработка методологии исследования; осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор данных; создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования и полученных данных.

Т. А. Дуюн – формулирование целей и задач исследования; осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор данных; создание и подготовка рукописи: написание черновика рукописи.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила в редакцию 03.03.2025; поступила после рецензирования 16.05.2025; принята к публикации 04.06.2025

Информация для авторов и читателей

Научный журнал «Инженерные технологии и системы» публикует оригинальные научные исследования, способствующие развитию науки в области инженерных систем и технологий.

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по научным специальностям и соответствующим им отраслям науки:

1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики (технические науки)

1.3.6. Оптика (технические науки)

1.3.13. Электрофизика, электрофизические установки (технические науки)

2.5.3. Трение и износ в машинах (технические науки)

4.1.4. Садоводство, овощеводство, виноградарство и лекарственные культуры (технические науки)

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки)

4.3.2. Электротехнологии, электрооборудование и энергоснабжение агропромышленного комплекса (технические науки)

Журнал приветствует статьи, имеющие потенциально высокий импакт-фактор и/или содержащие материал о значительных достижениях в указанных направлениях. Особое внимание следует уделить качеству перевода. Желательно, чтобы он был выполнен носителем английского языка.

Не допускается направление в редакцию уже опубликованных статей или статей, отправленных на публикацию в другие журналы. **В случае обнаружения одновременной подачи рукописи в несколько изданий опубликованная статья будет ретрагирована (отозвана из печати).** Мониторинг несанкционированного цитирования осуществляется с помощью систем «Антиплагиат» и «iThenticate».

При подготовке статьи к публикации в журнале «Инженерные технологии и системы» необходимо учесть следующие пункты:

1. Указать **УДК.**

2. **Заголовок статьи** должен кратко и точно отражать содержание статьи, тематику и результаты проведенного исследования. *Приводится на русском и английском языках.*

3. **Аннотация** (200–250 слов) выполняет функцию расширенного названия статьи и повествует о ее содержании. В ней должны быть четко обозначены следующие составные части:

1) Введение (Introduction);

2) Цель статьи (Aim of the Article);

3) Материалы и методы (Materials and Methods);

4) Результаты исследования (Results);

5) Обсуждение и заключение (Discussion and Conclusion).

Приводится на русском и английском языках.

4. **Ключевые слова** (5–10) являются поисковым образом научной статьи. В связи с этим они должны отражать основные положения, достижения, результаты, терминологию научного исследования. *Приводятся на русском и английском языках.*

5. **Благодарности.** В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам. *Приводятся на русском и английском языках.*

6. **Основной текст** статьи излагается на русском или английском языках.

1) Введение – постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности.

2) Обзор литературы. Необходимо описать основные (последние по времени) исследования и публикации, на которые опирается автор; современные взгляды на проблему; трудности при разработке данной темы; выделить нерешенные вопросы в пределах общей проблемы, которым посвящена статья.

3) Материалы и методы. В данном разделе описываются процесс организации эксперимента, примененные методики, использованная аппаратура; даются подробные сведения об объекте исследования; указывается последовательность выполнения исследования и обосновывается выбор используемых методов (наблюдение, опрос, тестирование, эксперимент, лабораторный опыт и т. д.).

4) Результаты исследования. Это основной раздел, цель которого – при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки сделанных выводов. Также должно быть обосновано, почему для анализа были выбраны именно эти данные.

5) Обсуждение и заключение. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области.

7. **Список литературы** (оформляется в соответствии с требованиями Ванкуверского стиля). Ссылаться нужно в первую очередь на оригинальные источники из научных журналов, включенных в глобальные индексы цитирования. Следует указать DOI или адрес доступа в сети Интернет. *Оформляется на русском и английском языках.*

8. **Об авторах.** Ф.И.О., организация(и), адрес организации(й) (требуется указать все места работы автора, в которых выполнялись исследования (постоянное место, место выполнения проекта и др.)), должность и ученое звание, ORCID, Researcher ID, электронная почта, телефон, почтовый адрес для отправки авторского экземпляра. *Приводится на русском и английском языках.*

9. **Заявленный вклад авторов.** Для формулировки фактического вклада каждого соавтора в выполненную работу необходимо использовать таксономию CRediT (Contributor Roles Taxonomy) – стандарт, разработанный Национальной организацией по информационным стандартам (National Information Standards Organization, NISO) (https://credit.niso.org/). Порядок указания авторов и соавторов статьи согласуется ими самостоятельно. *Приводится на русском и английском языках.*

10. **Техническое оформление.**

1) Редакция принимает тексты, сохраненные в формате .doc, .docx, .rtf. Желательно использовать шрифт Times New Roman, кегль 14 и интервал 1,5 строки. Расстановка переносов вручную не допускается. Запрещается использовать двойные пробелы в тексте, а также выполнять отступы (красная строка), используя пробелы.

2) Формулы набираются сочетанием основного шрифта и шрифта Symbol (исключение для дробей, сумм, квадратного корня) в Microsoft Equation 3.0 (Редактор формул в Microsoft Word) или Math Type 6. Латинские знаки в формулах и обозначениях (как в тексте, так и на рисунках) набираются курсивом. Формулы нумеруются в круглых скобках. Нумеровать следует только те формулы и уравнения, на которые есть ссылка в последующем изложении.

3) Все названия, подписи и структурные элементы графиков, таблиц, схем и т. д. оформляются на русском и английском языках.

4) Рисунки могут быть представлены в растровом или векторном формате с разрешением не ниже 300 dpi. Они должны допускать редактирование текста и возможность изменения размеров. Все графические данные помещаются в текст статьи, а также высылаются дополнительно в виде отдельных файлов. Разнохарактерные иллюстрации необходимо приводить к единому стилю графического исполнения, соблюдая единообразие их оформления. Графики, схемы и диаграммы необходимо оформлять в Microsoft Excel.

При подаче статьи в редакцию автор соглашается с положениями прилагаемого лицензионного договора.

Важным этапом в процессе отбора статьи является рецензирование. В журнале «Инженерные технологии и системы» принято «двойное слепое» (рецензент и автор не знают имен друг друга) рецензирование статей. Рецензент на основании анализа статьи принимает решение о рекомендации ее к публикации или о ее отклонении. В случае несогласия автора статьи с замечаниями рецензента его мотивированное заявление рассматривается редакционной коллегией.

Политика редакционной коллегии журнала базируется на современных юридических требованиях в отношении клеветы, авторского права, законности и плагиата, поддерживает Кодекс этики научных публикаций, сформулированный Комитетом по этике научных публикаций, и строится с учетом этических норм работы редакторов и издателей, закрепленных в Кодексе поведения и руководящих принципах наилучшей практики для редактора журнала и Кодексе поведения для издателя журнала, разработанных Комитетом по публикационной этике (COPE).

«Инженерные технологии и системы» – журнал открытого доступа, то есть все содержание находится в свободном доступе бесплатно для пользователя в соответствии с определением BOAI открытого доступа. Материалы журнала доступны по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная.

Журнал распространяется по подписке, заявкам высших учебных заведений, учреждений образования и отдельных лиц. Подписной индекс – 70539.

Сенин Петр Васильевич – главный редактор. Тел.: +7 (8342) 23-32-60.
Левцев Алексей Павлович – заместитель главного редактора. Тел.: +7 (8342) 25-41-01.
Чаткин Михаил Николаевич – заместитель главного редактора. Тел.: +7 (8342) 25-44-20.
Гордина Екатерина Павловна – ответственный секретарь. Тел.: +7 (8342) 48-14-24.

Information for authors and readers of the journal

Engineering Technologies and Systems journal accepts unpublished earlier original research results promoting the development of science in the field of engineering systems and technologies.

The journal is included in the List of the leading peer-reviewed scientific journals and publications, where basic scientific results of dissertations for the degrees of Doctor and Candidate of Sciences in scientific specialties and their respective branches of science should be published (Higher Attestation Commission under the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation):

Instruments and Methods of Experimental Physics

Optics

Electrophysics, Electrophysical Installations

Friction and Wear in Machines

Gardening, Olericulture, Viticulture and Medicinal Plants

Technologies, Machinery and Equipment for Agroindustrial Complex

Electrotechnologies, Electrical Equipment and Power Supply of Agroindustrial Complex

The journal gives preference to the articles with potentially high impact factor and/or containing materials about significant achievements in the specified areas of science. Special attention should be paid to the quality of the translation. Preferably it should be made by a native English speaker.

It is not allowed to submit papers that have already been published or sent for publication to other journals. **In the case of multiple submission of a manuscript, the published article will be retracted.** Monitoring of unauthorized citation is implemented by means of Antiplagiat and iThenticate systems.

To submit an article in the journal *Engineering Technologies and Systems* you should know:

1. It is necessary to indicate the **Universal Decimal Classification** (UDC) code.

2. **The title of the article** should accurately reflect the content of the article, the subject matter and the results of the research conducted.

The title should be written in Russian and English.

3. **The abstract** (200–250 words) serves as an enhanced title of the article and briefly presents its content. The abstract consists of the following components:

1) Introduction;

2) Aim of the Article;

3) Materials and Methods;

4) Results;

5) Discussion and Conclusion.

The abstract should be written in Russian and English.

4. Keywords (5–10) make the search profile of the scientific article. In this regard, they should reflect the main provisions, achievements, results and terminology of the scientific research.

Keywords should be written in Russian and English.

5. **Acknowledgements.** In this section the author may mention the people who helped them to prepare the article or the organizations that provided financial support. It is considered good style to express gratitude to anonymous reviewers.

Acknowledgements should be written in Russian and English.

6. **The main body** of the article should be written in Russian or in English.

1) Introduction. It contains formulation of the scientific problem, its relevance, connection with the most important tasks to be solved, the importance for the development of a particular area of science or practical activities.

2) Literature Review. It is necessary to describe the main (recent) pieces of research and publications relied upon by the author, modern views on the problem, difficulties in solving the problem as well as to highlight the unresolved issues within the general problem of the article.

3) Materials and Methods. This section describes the process of designing the experiment, the methods and equipment used; it gives detailed information about the subject and sequence of the research, justifies the choice of the methods used (observation, survey, testing, experiment, etc.).

4) Results. This is the main section, the purpose of which is to prove the working hypothesis (hypotheses) by analyzing, generalizing and explaining the data. The results should be brief, but they should provide sufficient information to evaluate the conclusions drawn. It should also be justified why the particular data were chosen for the analysis.

5) Discussion and Conclusion. In conclusion, the results of understanding the topic should be summarized; conclusions, generalizations and recommendations arising from the work should be made, their practical significance should be emphasized and the main directions for further research in the studied area should be determined.

7. **References** should be formatted in accordance with the requirements of the Vancouver Style. The original sources from scientific journals included in the global citation indices should be cited first of all. DOI or the URL of the source should be indicated.

References should be written in Russian and English.

8. Information **about the author(s)** includes: the author's first name and last name, the name of the institution and its address (it is required to specify all the institutions where the author works and where the research was conducted (permanent place of work, the place where the project was done, etc.)). The author's position and academic title, ORCID, Researcher ID, e-mail, phone number, postal address for sending a personal copy of the journal issue.

Information about the authors should be written in Russian and English.

9. **Authors contribution.** To formulate the actual contribution of each co-author to the work performed, it is necessary to use the taxonomy CRediT (Contributor Roles Taxonomy), a standard developed by the National Information Standards Organization (NISO) (https://credit.niso.org/). The order of indication of authors and co-authors of the article is agreed by them independently.

Contribution of the authors should be written in Russian and English.

10. **Manuscript Format Guidelines.**

1) The manuscript should be typed in the Microsoft Word text processing program for Windows (.doc, .docx, .rtf): sheet size – A4, Times New Roman font, font size – 14, line spacing – 1.5. Manual hyphenation is not allowed. It is forbidden to use double spaces in the text, as well as to indent (red line) using spaces.

2) Formulas are typed by combining the main font and the Symbol font (exception for fractions, sums, square root) in Microsoft Equation 3.0 (Formula Editor in Microsoft Word) or Math Type 6. Latin symbols in formulas and notation (both in the text and in the figures) typed in italics. Formulas are numbered in parentheses. Only those formulas and equations referenced in the following presentation should be numbered.

3) All titles, signatures and structural elements of graphs, tables, charts, etc., are to be provided in Russian and English.

4) Figures can be presented in raster or vector format with a resolution of at least 300 dpi. They should allow text editing and resizability. All graphic data are placed in the text of the article, as well as sent additionally as separate files. Diverse illustrations should be brought to a single style of graphic performance, while respecting the uniformity of their design. Graphs, charts and diagrams must be drawn up in Microsoft Excel.

When submitting an article to the journal, the author agrees with the provisions of the attached license agreement.

As part of the submission, the journal will peer review your article before deciding whether to publish it. *Engineering Technologies and Systems* journal uses double-blind review, which means that both the reviewer and author identities are concealed from the reviewers, and vice versa. On the basis of the analysis of the article, the reviewer makes a decision whether to recommend the article for publication or reject it. If the author disagrees with the reviewer's comments, their reasoned statement shall be considered by the Editorial Board.

Editorial staff's policy is based on modern legal requirements concerning libel, copyright, legitimacy, plagiarism, ethical principles, kept in community of leading scientific issues publishers. Journal's editorial policy is based upon traditional ethical principles of Russian academic periodicals; it supports Academic Periodicals Ethical Codex, stated by Committee on Publication Ethics (Russia, Moscow) and it is formed in account of standards of ethics of editors' and publishers' work confirmed by Code of Conduct and Best Practice Guidelines for Journal Editors and Code of Conduct for Journal Publishers, developed by Committee on Publication Ethics (COPE).

Engineering Technologies and Systems is an open access journal, which means that all content is freely available without charge to the user or his/her institution. Users are allowed to read, download, copy, distribute, print, search, or link to the full texts of the articles, or use them for any other lawful purpose, without asking prior permission from the publisher or the author in accordance with the BOAI definition of open access. All the materials of the journal are made available under a Creative Commons "Attribution" 4.0 license.

The journal is distributed on the basis of a subscription, requests of higher education institutions, educational institutions and individuals. The subscription index is 70539.

Petr V. Senin – Editor-in-Chief. Tel.: +7 (8342) 233260.
Alexey P. Levtsev – Deputy Editor-in-Chief. Tel.: +7 (8342) 254101.
Mikhail N. Chatkin – Deputy Editor-in-Chief. Tel.: +7 (8342) 254420.
Ekaterina P. Gordina – Executive Editor. Tel.: +7 (8342) 481424.



Редакторы – *М. А. Сульдина, С. Х. Зинина*
Перевод *Н. Н. Плеханковой*
Компьютерная верстка *Е. А. Климкиной*
Информационная поддержка *Р. В. Карасева*

Территория распространения – Российская Федерация, зарубежные страны.
Подписано в печать 18.09.2025 г. Дата выхода в свет 30.09.2025 г.
Формат 70 × 100 $^{1}/_{16}$. Усл. печ. л. 19,18.
Тираж 1 000 экз. 1 завод – 100 экз. Заказ № 426. Свободная цена.

Адрес типографии: 430005, Российская Федерация, Республика Мордовия, г. Саранск, ул. Советская, д. 24
(Издательство федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева»)



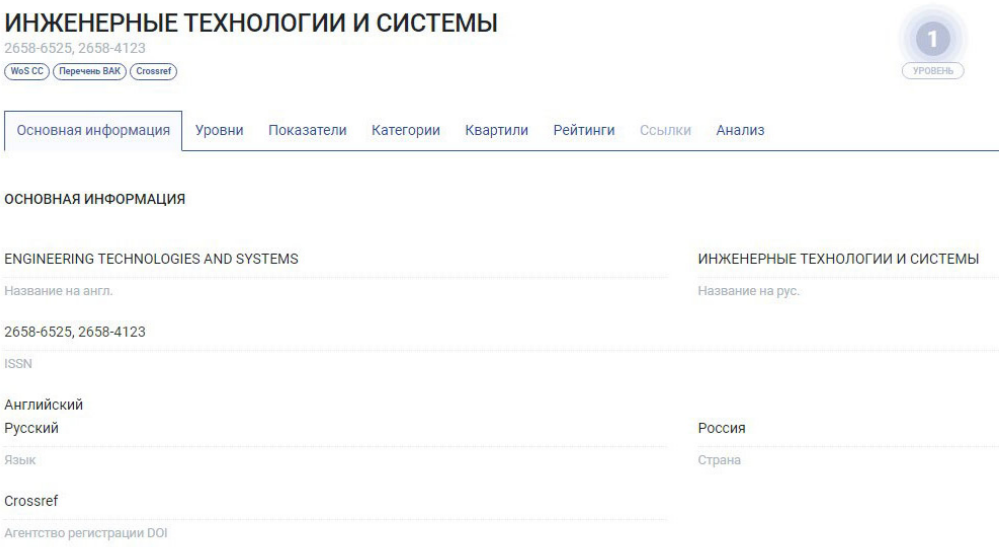
Editors *M. A. Suldina, S. H. Zinina*
Translation *N. N. Plekhankova*
Desktop publishing *E. A. Klimkina*
Informational support *R. V. Karasev*

Distributed in Russian Federation and foreign countries.
Signed to print 18.09.2025. Date of publishing 30.09.2025.
Sheet size 70 × 100 $^{1}/_{16}$. Conventional printed sheets 19.18.
Number of copies 1 000. 1st edition – 100 copies. Order no. 426. Free price.

Address of Printing House: 24 Sovetskaya St., Saransk 430005, Republic of Mordovia, Russian Federation
(Publishing House of National Reserch Mordovia State University)

Уважаемые авторы и читатели!

Журналу «Инженерные технологии и системы»
присвоен 1 уровень
в Едином государственном перечне научных изданий –
«Белый список» (ЕГПНИ)



Квитанция для приобретения печатной версии журнала «Инженерные технологии и системы»

Извещение

Форма № ПД-4

УФК по Республике Мордовия **(ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарёва» л/с 20096X35120)**
КПП 132601001

(наименование получателя платежа)

1326043499 **03214643000000010900**

(ИНН получателя платежа) (номер счета получателя платежа)

40102810345370000076
корреспондентский счет

Отделение-НБ РЕСПУБЛИКА МОРДОВИЯ БАНКА РОССИИ//УФК по Республике Мордовия г. Саранск БИК **018952501**

(наименование банка получателя платежа)

КБК **00000000000000000440** **ОКТМО 89701000**

за реализацию журнала "Инженерные технологии и системы"

(наименование платежа) (номер лицевого счета (код) плательщика)

Кассир

Ф.И.О. плательщика: _____

Адрес плательщика: _____

Сумма платежа: __**500**__ руб. __**00**__коп. Сумма платы за услуги: _____ руб. _____коп

Итого _____ руб. _____ коп. "_____" _____ 20___г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка ознакомлен и согласен. **Подпись плательщика**_____

УФК по Республике Мордовия **(ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарёва» л/с 20096X35120)**
КПП 132601001

(наименование получателя платежа)

1326043499 **03214643000000010900**

(ИНН получателя платежа) (номер счета получателя платежа)

40102810345370000076
корреспондентский счет

Отделение-НБ РЕСПУБЛИКА МОРДОВИЯ БАНКА РОССИИ//УФК по Республике Мордовия г. Саранск БИК **018952501**

(наименование банка получателя платежа)

КБК **00000000000000000440** **ОКТМО 89701000**

за реализацию журнала " Инженерные технологии и системы "

Квитанция (наименование платежа) (номер лицевого счета (код) плательщика)

Кассир

Ф.И.О. плательщика: _____

Адрес плательщика: _____

Сумма платежа: __**500**__ руб. __**00**__ коп. Сумма платы за услуги: ____ руб. ____коп.

Итого _____ руб. _____ коп. "_____" _____ 20___г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка ознакомлен и согласен.

Подпись плательщика_____

✂ – линия отреза