

<https://doi.org/10.15507/2658-4123.26363>

ISSN 2658-4123

eISSN 2658-6525

Том 36, № 3. 2026

Vol. 36, no. 3. 2026

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

Founded in January 1990
Periodicity:
Quarterly

16+



ИНЖЕНЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ ENGINEERING TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

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

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

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

SCIENTIFIC JOURNAL

FOUNDER AND PUBLISHER –
Federal State
Budgetary Educational
Institution
of Higher Education
“National Research
Ogarev Mordovia
State University”

Editor-in-Chief 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 (Роскомнадзор),
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. Большевикская, д. 68/1
Тел./факс: +7 (8342) 48-14-24

Founder, Publisher and Editorial Office address:

68/1 Bolshevistskaya St., Saransk 430005,
Republic of Mordovia,
Russian Federation
Tel/Fax: +7 8342 481424

© ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарева», 2026

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

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Сенин Петр Васильевич – *главный редактор*, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технического сервиса машин Национального исследовательского Мордовского государственного университета, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3400-7780>, senin53@mail.ru (Саранск, Российская Федерация)

Левцев Алексей Павлович – *заместитель главного редактора*, доктор 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. Лешанкина 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, заведующий кафедрой 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)

Игунов 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 Федеральной научной агроинженерной программы ВИАМ; 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)

Мохамад Бархм Абдулла – Ph.D., преподаватель кафедры нефтяных технологий Технического института Коя Эрбильского политехнического университета, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8107-6127> (Эрбиль, Ирак).

Несмийн 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, проректор по научной работе 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, Professor of the Department of Machinery Technical Service of the National Research Mordovia State University, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3400-7780>, senin53@mail.ru (Saransk, Russian Federation)

Alexey P. Levitsev – *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 (Bartın, 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. Gorbатов 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)

Barhm A. Mohamad – PhD, Lecturer at Department of Petroleum Technology, Koya Technical Institute, Erbil Polytechnic University, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8107-6127> (Erbil, Iraq).

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, Vice-Rector for Science, 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)

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Красовский В. В., Трофимов И. М., Завалий А. А. Численный анализ динамики шарнирных ножей с криволинейной кромкой в ротационных обрезочных аппаратах: результаты параметрического исследования	462
Мухаметдинов А. М., Мударисов С. Г., Мифтахов И. Р. Параметры модели цифрового двойника гороха для моделирования методом дискретных элементов (на англ. яз.)	483
Таранов А. Ю. Разработка системы релейного управления роением роботов для сельскохозяйственных работ (на англ. яз.)	500
Габитов И. И., Сафин Ф. Р., Катков А. А., Дмитриев А. М., Казьмирук А. С., Кашапов А. А. Нейросетевой подход в цифровом фенотипировании снопового материала гороха: от многоклассовой сегментации к специализированным моделям уточнения	518
Уско И. А., Долгушин А. А., Шилкина М. В., Раков Н. В. Оценка эффективности применения AR-ассистента в техническом сервисе машин	541

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

Беляков М. В., Ефременков И. Ю. Обнаружение амоксициллина в молоке методом анализа температурных зависимостей фотолюминесценции	561
Гербер Ю. Б., Вербицкий А. П. Эффективность теплообмена при нагреве молока в системе «Солнечный коллектор – пластинчатый теплообменник»	578
Юдаев И. В., Акимов А. А., Скворцов С. С., Иванютина Н. Н., Беленков А. И., Плотницкий И. О. Повышение посевных качеств семян льна-долгунца при обработке в магнитном градиентном поле постоянного тока	595

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Лимаренко Н. В., Савенков Д. Н., Суханов М. К. Классификация режимов работы гидроцилиндра зерноуборочного комбайна по данным экспериментальных исследований	618
Антибас И. Р. Проектирование и оценка интеллектуальной гидравлической системы защиты для глубоких рыхлителей на каменистых почвах (на англ. яз.)	644

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ

Хантимеров С. М., Гарипов Р. Р., Емельянов И. А., Сулейманов Н. М. Повышение диспергируемости многостенных углеродных нанотрубок и их равномерное распределение в полимерной матрице при мягкой кислотной обработке	662
Информация для авторов и читателей	676

CONTENTS

TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT

Krasovskiy V. V., Trofimov I. M., Zavaliy A. A. Numerical Analysis of the Dynamics of Free-Swinging Knives with a Curved Edge in Rotary Cutting Machines: The Results of a Parametric Study	462
Mukhametdinov A. M., Mudarisov S. G., Miftakhov I. R. Parameters of the Digital Twin Model of Peas for Modeling Using the Discrete Element Method	483
Taranov A. Yu. Development of a Relay-Based Control System for a Robot Swarm Used for Agricultural Operations	500
Gabitov I. I., Safin F. R., Katkov A. A., Dmitriev A. M., Kazmiruk A. S., Kashapov A. A. A Neural Network Approach to Digital Phenotyping of Pea Sheaf Material: from Multi-Class Segmentation to Specialized Refinement Models	518
Usko I. A., Dolgushin A. A., Shilkina M. V., Rakov N. V. Evaluation of AR Assistant Effectiveness for Machinery Technical Service	541

ELECTRICAL TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT

Belyakov M. V., Efremkov I. Yu. Determination of the Presence of Amoxicillin in Milk by the Temperature Photoluminescence Properties	561
Gerber Yu. B., Verbitsky A. P. Heat Transfer Efficiency during Heating Milk in a Solar Collector-Plate Heat Exchanger System	578
Yudaev I. V., Akimov A. A., Skvortsov S. S., Ivanyutina N. N., Belenkov A. I., Plotnitsky I. O. Improving the Sowing Qualities of Fibre Flax Seeds Treated in a Direct Current Magnetic Gradient Field	595

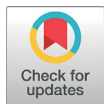
MECHANICAL ENGINEERING

Limarenko N. V., Savenkov D. N., Sukhanov M. K. Classification of the Operating Modes of a Combine Harvester Hydraulic Cylinder based on Experimental Study Data	618
Antypas I. R. Design and Evaluation of an Intelligent Hydraulic Protection System for Subsoiler Plows in Rocky Soil	644

INSTRUMENTS AND METHODS OF EXPERIMENTAL PHYSICS

Khantimerov S. M., Garipov R. R., Emelyanov I. A., Suleimanov N. M. Increasing the Dispersibility of Multi-walled Carbon Nanotubes and Their Uniform Distribution in the Polymer Matrix Using Soft Acid Treatment	662
--	-----

<i>Information for Authors and Readers of the Journal</i>	676
---	-----

**ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ /
TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT**<https://doi.org/10.15507/2658-4123.26363.462-482>EDN: <https://elibrary.ru/eumhww>

УДК / UDK 631.31:531.133.3:001.8

*Оригинальная статья / Original article***Численный анализ динамики
шарнирных ножей с криволинейной кромкой
в ротационных обрезочных аппаратах:
результаты параметрического исследования****В. В. Красовский^{1, 2✉}, И. М. Трофимов¹, А. А. Завалий¹**¹ *Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского,
г. Симферополь, Российская Федерация, <https://ror.org/05erbjx97>*² *Научно-исследовательский институт
сельского хозяйства Крыма,**г. Симферополь, Российская Федерация,
<https://ror.org/00dqsh274>*✉ vitaliy-krasovskiy@mail.ru*Аннотация*

Введение. Современные ротационные обрезочные аппараты обладают высокой энергозатратностью, при этом их ударные нагрузки негативно влияют на качество среза. Повышение эффективности и обеспечение щадящего режима резания возможно при использовании шарнирных ножей с криволинейной кромкой в конструкции обрезочного аппарата. Для этого необходима разработка динамической модели, учитывающей взаимодействие ножа с ветвью, силы инерции и упругие свойства пружинного механизма.

Цель исследования. Оценка динамики шарнирных ножей с криволинейной кромкой в ротационных обрезочных аппаратах на основе математической модели силового баланса для определения оптимальных параметров шарнирного механизма.

Материалы и методы. Объектом исследования являлся процесс резания однолетних ветвей виноградной лозы диаметром $D = 20$ мм с физико-механическими свойствами, соответствующими пределу прочности при срезе $\sigma = 1 \cdot 10^6$ Па. Математическая модель силового баланса шарнирного ножа описывалась системой уравнений, численное решение которой осуществлялось методом Рунге – Кутты 4-го порядка в программной среде Mathcad. Параметрический анализ варьирования частоты вращения ротора ω проводился в диапазоне $25\text{--}100\text{ с}^{-1}$, а усилия пружины – в диапазоне $10\text{--}200$ Н. Исследование выполнялось в следующей последовательности: задание исходных геометрических и физико-механических параметров системы; численное моделирование динамики ножа для каждого набора параметров; анализ полученных зависимостей угла отклонения ножа и траектории точки контакта; определение оптимальных режимов работы.

© Красовский В.В., Трофимов И.М., Завалий А.А., 2026

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

Результаты исследования. Показана зависимость угла отклонения ножа от частоты вращения ротора и влияния жесткости пружины. Установлен характер движения точек контакта режущей кромки и поверхности реза для прямолинейного и спиралевидного ножа. Определены оптимальные диапазоны частот вращения ротора ($\omega = 28 \dots 36 \text{ c}^{-1}$) и усилия пружины ($F_{spr} = 100 \dots 200 \text{ Н}$) для эффективного резания, обеспечивающего минимальные вибрации и стабильное качество среза ветвей диаметром до 20 мм.

Заключение. Применение шарнирных ножей с криволинейной (спиралевидной) режущей кромкой позволяет снизить ударные нагрузки на 25–30 % по сравнению с прямолинейными ножами за счет более плавного скользящего вхождения в материал. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и модернизации ротационных обрезочных аппаратов для виноградарства и садоводства, что позволит повысить надежность оборудования, снизить энергозатраты и улучшить качество обрезки многолетних насаждений.

Ключевые слова: ротационный режущий аппарат, шарнирные ножи, криволинейная кромка, динамика ножей, параметрическое исследование, численное моделирование, ударные нагрузки, качество среза

Финансирование: работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 26-26-20042 «Исследование динамики взаимодействия рабочих органов с растениями для создания адаптивных систем защиты садовых насаждений (на примере Крымского региона)».

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Красовский В.В., Трофимов И.М., Завалий А.А. Численный анализ динамики шарнирных ножей с криволинейной кромкой в ротационных обрезочных аппаратах: результаты параметрического исследования. *Инженерные технологии и системы*. 2026;36(3):462–482. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.26363.462-482>

Numerical Analysis of the Dynamics of Free-Swinging Knives with a Curved Edge in Rotary Cutting Machines: The Results of a Parametric Study

V. V. Krasovskiy^{a, b✉}, I. M. Trofimov^a, A. A. Zavaliy^a

^a V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russian Federation, <https://ror.org/05erbjx97>

^b Research Institute of Agriculture of Crimea, Simferopol, Russian Federation, <https://ror.org/00dqsh274>

✉ vitaliy-krasovskiy@mail.ru

Abstract

Introduction. Modern rotary cutting machines are of high energy consumption, while their impact loads negatively affect of the cut quality. Increasing efficiency and ensuring a gentle cutting mode is possible when using free-swinging knives with a curved edge in the design of the cutting machine. This requires the development of a dynamic model

taking into account the knife interaction of with the branch, the inertial forces and the spring mechanism elastic properties.

Aim of the Study. The study is aimed at evaluating the dynamics of free-swinging knives with a curved edge in rotary cutting machines. The evaluation was based on a mathematical model of force balance to determine the optimal parameters of the free-swinging knife.

Materials and Methods. The object of the study was the process of cutting one-year old grape-vine branches with a diameter of $D = 20$ mm and with physical and mechanical properties corresponding to the shear strength $\sigma = 1 \cdot 10^6$ Pa. To conduct the study, there was developed a mathematical model of the force balance of a free-swinging knife. This model was described by a system of equations, taking into account the forces of inertia, spring elasticity and resistance of the branch material. The numerical solution of the system was carried out by the Runge – Kutta method of the 4th order in the Mathcad software environment. The parametric analysis of the rotor speed variation ω was conducted in the range of 25–100 s⁻¹ and of the spring force in the range of 10–200 N. The study was performed in the following sequence: setting of the initial geometric and physical and mechanical parameters of the system; numerical simulation of knife dynamics for each set of parameters; analysis of the obtained dependences of the angle of deflection of the knife and the trajectory of the contact point; determination of optimal operating modes.

Results. In the article, there has been shown the dependence of the knife deflection angle on the rotor speed and the effect of spring stiffness. The pattern of the movement of the contact points of the cutting edge and the cutting off surface for rectilinear and spiral knives has been determined. The optimal ranges of rotor speed ($\omega = 28 \dots 36$ s⁻¹) and spring force ($F_{spr} = 100 \dots 200$ N) have been also determined for efficient cutting, ensuring minimal vibration and consistent cut quality on branches up to 20 mm in diameter.

Conclusion. Numerical solution has shown that the use of free-swinging knives with a curved (spiral) cutting edge reduces impact loads by 25–30% compared with straight knives due to a smoother sliding entry into the material. The results obtained can be used in the design and modernization of rotary cutting machines for viticulture and horticulture that will increase the equipment reliability, reduce energy consumption and improve the quality of cutting perennial plants.

Keywords: rotary cutting machine, free-swinging knives, curved edge, knife dynamics, parametric study, numerical simulation, impact loads, cut quality

Funding: The work was supported by the Russian Science Foundation Grant No. 26-26-20042 «Investigation of the dynamics of the interaction of working bodies with plants for the creation of adaptive systems for the protection of garden plantings (on the example of the Crimean region)».

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

For citation: Krasovskiy V.V., Trofimov I.M., Zavaliy A.A. Numerical Analysis of the Dynamics of Free-Swinging Knives with a Curved Edge in Rotary Cutting Machines: The Results of a Parametric Study. *Engineering Technologies and Systems*. 2026;36(3):462–482. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.26363.462-482>

ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие агропромышленного комплекса, в частности садоводства и виноградарства, характеризуется переходом на интенсивные технологии. Это особенно актуально для регионов с благоприятными климатическими условиями, таких как Республика Крым и Юг России, где возрастают объемы работ по уходу

за многолетними насаждениями¹ [1]. В этих условиях ручная обрезка становится экономически неэффективной, так как существующие отечественные машины, как правило, не отвечают современным требованиям по производительности и качеству работы, а импортная техника имеет высокую стоимость [1; 2]. Данное противоречие подчеркивает острую необходимость в проведении научных исследований и разработок, направленных на создание высокоэффективных и доступных режущих органов для обрезки [3; 4].

Существующие машины для механизированной обрезки характеризуются высоким энергопотреблением, значительными ударными нагрузками, приводящими к повреждению растительных тканей, и ограниченной функциональностью при обработке ветвей различного диаметра [5; 6]. Данная проблема определяет актуальную научно-практическую задачу: создание высокоэффективных и адаптивных режущих органов для ротационных обрезочных аппаратов, обеспечивающих качественный срез с минимальными энергозатратами.

В мировой и отечественной практике широко распространены дисковые, сегментные и гибкие режущие аппараты, основным недостатком которых является ударный характер нагрузки, вызывающий повышенный износ оборудования и нестабильность процесса резания [5; 6]. Ротационные аппараты считаются наиболее перспективными для механизации обрезки, однако существующие конструкции недостаточно учитывают динамические особенности взаимодействия инструмента с неоднородным материалом ветвей, что приводит к вибрациям и росту энергозатрат [7–9].

Перспективным направлением является использование шарнирных ножей, способных адаптироваться к изменяющимся условиям резания [3; 8]. Введение активной степени свободы позволяет автоматически регулировать угол атаки, снижая пиковые нагрузки. Однако комплексных исследований динамики шарнирных ножей с криволинейной режущей кромкой, учитывающих взаимовлияние кинематических, силовых и конструктивных параметров, недостаточно [9]. Остается открытым вопрос о влиянии геометрической формы лезвия и упругих свойств пружинного натяжителя на характер движения точек контакта и распределение усилий в процессе резания.

Основная идея работы заключается в обосновании возможности управления процессом резания путем использования шарнирно закрепленных ножей с криволинейной (спиралевидной) режущей кромкой. В отличие от традиционных жестко закрепленных или прямолинейных шарнирных ножей, предлагаемое решение может позволить реализовать принцип скользящего резания с автоматической адаптацией угла атаки, что заменит ударное нагружение плавным врезанием, снизит пиковые усилия и повысит качество среза. Работа дополняет существующие представления о механике резания, вводя новые кинематические и силовые взаимосвязи в системе «нож–ветка–пружинный механизм».

¹ Гаппоев А.И., Тхапсаев В.А. Машины для контурной обрезки виноградников и садов. В: Достижения науки – сельскому хозяйству: материалы Всероссийской науч.-практ. конф. (заочной). Владикавказ: Горский государственный аграрный университет; 2017. С. 289–293. <https://elibrary.ru/ypdksk>

Целью исследования является оценка влияния конструктивных и режимных параметров шарнирного механизма (геометрия режущей кромки, частота вращения ротора и усилие пружины) на динамические характеристики процесса резания ветвей в ротационном обрезочном аппарате. Для этого необходимо: разработать математическую модель силового баланса шарнирного ножа, учитывающую силы резания, инерционные силы, упругие свойства пружинного механизма и геометрические параметры системы; провести параметрический анализ динамики шарнирных ножей с прямолинейной и спиралевидной режущей кромкой в зависимости от частоты вращения ротора и усилия пружины; установить характер движения точек контакта режущей кромки с поверхностью ветки для обоих типов ножей и определить траектории их смещения; выявить оптимальные диапазоны режимных параметров, обеспечивающих минимальные ударные нагрузки и стабильное качество среза для каждого типа ножа.

Решение указанной проблемы имеет прямое практическое значение для агропромышленного комплекса. Совершенствование конструкций позволит сократить эксплуатационные затраты и потребность в квалифицированной рабочей силе, повысить качество обрезки и урожайность. Развитие теоретических основ динамики режущих органов, взаимодействующих с упругим и анизотропным растительным материалом, позволит создать импортозамещающие разработки.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Анализ конструкций режущих аппаратов, применяемых в сельском хозяйстве, позволяет выявить ряд существенных недостатков. Широко распространенные дисковые, сегментные и гибкие аппараты демонстрируют высокое энергопотребление, неудовлетворительное качество среза, приводящее к повреждению растительных тканей, и ограниченную функциональность при обработке ветвей разного диаметра [10; 11]. Исследования, посвященные процессам измельчения древесных отходов, подтверждают, что ударный характер нагрузки, свойственный многим традиционным конструкциям, является основной причиной повышенного износа оборудования и нестабильности процесса резания. Кроме того, оптимизация режимов резания и конструктивных параметров инструмента позволяет существенно повысить его стойкость и снизить износ [12].

Ротационные режущие аппараты являются наиболее подходящими для механизации обрезки [9; 10; 13]. Однако существующие конструкции часто не в полной мере учитывают динамические особенности взаимодействия режущего инструмента с упругим и анизотропным растительным материалом, что приводит к значительным вибрациям, росту энергозатрат и снижению долговечности [5; 14; 15]. Важным аспектом является не только эффективность измельчения, но и качество получаемой щепы, что актуально для ее дальнейшего использования. Зарубежные исследователи отмечают значительное влияние системы измельчения на производительность машины и гранулометрический состав продукта [1; 2].

Значительный вклад в понимание механики резания растительных материалов внесли В. Н. Гаранин и Д. Л. Болочко, разработавшие модель для обоснования оптимальных скоростей резания древесины с учетом анизотропных свойств материала.

В частности, ими предложена зависимость, связывающая скорость резания со скоростью распространения напряжений сжатия, позволяющая определять минимально необходимую скорость обработки, при которой исключается чрезмерная деформация материала и обеспечивается качество резания [14]. Тем не менее, вопросы динамики и снижения ударных нагрузок в аппаратах с шарнирно-закрепленными ножами, обладающими активной степенью свободы, изучены в меньшей степени [8].

Перспективным направлением для устранения перечисленных недостатков является использование шарнирных ножей с криволинейной режущей кромкой [3; 16]. Шарнирное крепление позволяет ножу адаптироваться к изменяющимся условиям резания, а криволинейный профиль, в частности, реализованный по спирали Архимеда, обеспечивает более плавное вхождение в материал и снижение пиковых нагрузок [3; 4]. Последние патентные разработки в этой области, например, полезная модель измельчителя растительных материалов, подтверждают актуальность и востребованность таких технических решений.

Анализ литературы показывает, что, несмотря на наличие значительного количества исследований, задача комплексного анализа динамики шарнирных ножей с криволинейной кромкой в ротационных аппаратах, которая учитывает взаимовлияние кинематических, силовых и конструктивных параметров, остается актуальной [8; 9]. Настоящее исследование направлено на восполнение этого пробела путем разработки кинематической модели и проведения параметрического анализа для определения оптимальных условий работы, обеспечивающих минимизацию ударных нагрузок и повышение качества обрезки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования

Объектом исследования является процесс резания однолетних одревесневших ветвей виноградной лозы (*Vitis Vinifera L.*) в ротационном обрезочном аппарате. Выбор объекта обусловлен типичными агротехническими условиями обрезки виноградников в Республике Крым и южных регионах России. Диаметр ветвей, подлежащих обрезке, в соответствии с технологическими требованиями составляет $D = 20$ мм. Ветви рассматривались как изотропный упруго-пластический материал с усредненными физико-механическими характеристиками², типичными для одревесневших побегов плодовых культур: предел прочности при срезе $\sigma = 1 \cdot 10^6$ Па, плотность $\rho = 600$ кг/м³, модуль упругости $E = 10 \cdot 10^9$ Па. Сечение ветки принималось круглым, а ее ориентация относительно плоскости вращения ножа – перпендикулярной.

Материалы и процедура исследования

Для проведения вычислительного эксперимента использовались справочные данные по физико-механическим свойствам древесины виноградной лозы, полученные из открытых источников и ранее опубликованных работ [14]. Геометрические

² Папазов А.П., Стоянов В.В. Основные допущения структуры древесины виноградной лозы. Вестник Одесской государственной академии строительства и архитектуры. 2005;(20):299–301. URL: <https://mx.odaba.edu.ua/bitstream/123456789/1226/1/Основные%20допущения%20структуры%20древесины%20виноградной%20лозы.pdf> (дата обращения: 12.10.2025).

параметры шарнирного ножа были выбраны на основе анализа существующих конструкций ротационных обрезочных аппаратов [3; 8].

Параметрический анализ проводили на основе выбранных диапазонов изменения основных параметров, характерных для реальных условий эксплуатации ротационных обрезочных аппаратов. В частности, варьировались: частота вращения ротора, усилие пружины, геометрия режущей кромки (прямолинейная или спиралевидная). Значения и диапазоны исходных данных для анализа динамики шарнирного ножа в процессе резания ветки приведены в таблице. Аналогичный подход к оптимизации параметров измельчителей растительных материалов с использованием регрессионного моделирования был применен авторами ранее [17].

Т а б л и ц а

T a b l e

Исходные данные для расчета угла поворота ножа
Initial data for calculating the knife rotation angle

Наименование / Name	Значение для прямолинейного ножа / Value for straight knife	Значение для спиралевидного ножа / Value for spiral knife
Толщина ножа d , м / Knife thickness d , m	$3 \cdot 10^{-3}$	
Диаметр режущей кромки d_1 , м / Diameter of the cutting edg d_1 , m	$0,05 \cdot 10^{-3}$	
Диаметр ветки D , м / Branch diameter D , m	$20 \cdot 10^{-3}$	
Радиус контакта ножа и ветки R_0 , м / The radius of the contact between the knife and the branch R_0 , m	$200 \cdot 10^{-3}$	
Длина плеча рычага ножа a , м / Length of the knife lever arm a , m	$100 \cdot 10^{-3}$	$213 \cdot 10^{-3}$
Масса ножа M_n , кг / Knife weight M_n , kg	$200 \cdot 10^{-3}$	
Напряжение разрушения ветки σ , Па / Branch destruction stress σ , Pa	$1 \cdot 10^6$	
Сила действия пружины F_{spr} , Н / Spring force F_{spr} , N	10–200	
Частота вращения ротора ω , с ⁻¹ / Rotor speed ω , s ⁻¹	50–100	25–50
Радиус крепления шарнира b , м / Hinge mounting radius b , m	–	$48 \cdot 10^{-3}$
Угол наклона рычага ножа α_0 , ° / The angle of the knife lever is the angle of the hinge axis position α_0 , °	–	63
Угол положения оси шарнира β , ° / The angle of the hinge axis position β , °	–	47,8

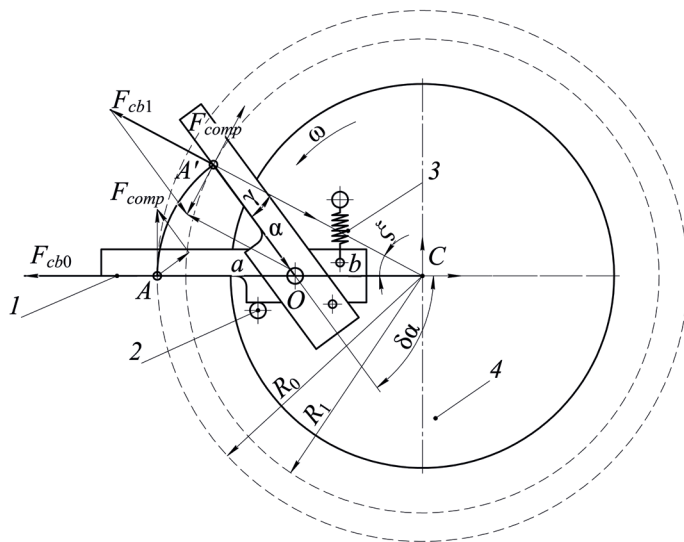
Источник: таблица составлена авторами на основе анализа конструктивных параметров ротационных обрезочных аппаратов [3; 8] и физико-механических характеристик древесины виноградной лозы [14].

Source: The table is compiled by the authors based on the analysis of design parameters of rotary cutting machines [3; 8] and the physical and mechanical characteristics of grapevine wood [14].

Таблица представляет собой исходные данные и диапазоны варьируемых параметров, использованные для численного моделирования.

Была разработана динамическая модель взаимодействия ножа с ветвью с учетом сил инерции, упругих свойств механизма пружинного натяжителя и геометрических параметров системы. Она предполагает использование абсолютно жесткого ножа, изготовленного из инструментальной стали, что обеспечивает износостойкость и не влияет на выявленные кинематические закономерности.

Кинетика движения шарнирного ножа для случая прямого контакта его прямолинейного лезвия с поверхностью ветки изображена на рисунке 1. В схему включен пружинный натяжитель 3 и стопор 2, которые удерживают шарнирный нож 1 в радиальном направлении ротора 4.



Р и с. 1. Схема контакта шарнирного ножа с веткой:
1 – нож; 2 – стопор; 3 – пружинный натяжитель; 4 – ротор

F i g. 1. The contact diagram of the free-swinging knife with the branch:
1 – knife; 2 – stopper; 3 – spring tensioner; 4 – rotor

Примечание: a – длина плеча рычага ножа, м; b – радиус крепления шарнира, м; R_0 – начальный радиус контакта, м; R_1 – текущий радиус контакта, м; C – центр вращения ротора; O – ось шарнира; A – точка контакта в начальный момент; A' – текущее положение точки контакта; ω – частота вращения ротора, с^{-1} ; $\delta\alpha$ – угол поворота ножа вокруг шарнира, $^\circ$; γ – угол между плечом ножа OA' и радиусом CA' , $^\circ$; ξ – угол поворота радиуса контакта, $^\circ$; F_{comp} – сила сопротивления резанию, Н; F_{cb1} – центробежная сила инерции, действующая на нож, Н; F_{cb0} – составляющая центробежной силы или сила, связанная с инерцией массы ножа в исходном (неотклоненном) положении, Н.

Note: a is the length of the knife lever arm, m; b is the radius of the hinge attachment, m; R_0 is the initial contact radius, m; R_1 is the current contact radius, m; C is the center of rotation of the rotor; O is the axis pin; A is the point of contact at the initial moment; A' is the current position of the point; ω – rotor speed, c^{-1} ; $\delta\alpha$ – the angle of rotation of the knife around the pin O ; γ – the angle between the shoulder of the knife OA' and the radius CA' , $^\circ$; ξ – the angle of rotation of the contact radius, $^\circ$; F_{comp} – the cutting resistance force, Н; F_{cb1} – the centrifugal force of inertia acting on the knife, Н; F_{cb0} – the component centrifugal force or the force associated with the inertia of the knife mass in the initial (non-tilted) position, Н.

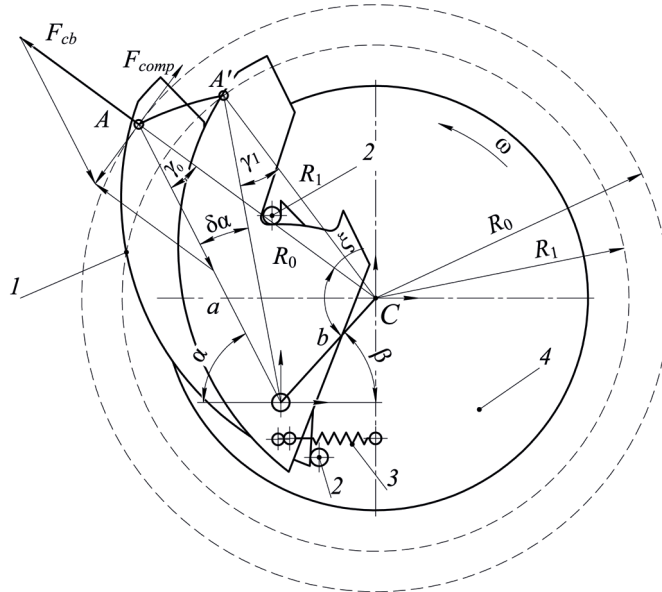
Источник: рисунки 1, 2 составлены авторами статьи в программе Компас-3Д.

Source: Figures 1, 2 were compiled by the authors of the article in the program Kompas-3D.

На рисунках 1 и 2 показан режущий орган и его кинематические параметры. Ветка условно расположена в зоне контакта с ножом (точка A). Ее сечение перпендикулярно плоскости рисунка, а условная линия реза проходит через точку A в направлении, определяемом геометрией контакта и вектором относительной скорости ножа. Для наглядности взаимодействия на рисунках 1 и 2 ветка схематически не показана, так как целью данных схем является демонстрация геометрии и сил, действующих на шарнирный нож, а не конфигурации ветки.

Использование пружинного натяжителя и стопора, удерживающих шарнирный нож в радиальном направлении ротора, позволяет существенно уменьшить величину его отклонения и обеспечивает достижение потребной силы резания при малых частотах вращения ротора. В самонастраивающемся режущем аппарате натяжитель играет роль обратной связи, которая обеспечивает автоматическое установление угла скольжения ножа по линии реза ветки для минимального требуемого усилия резания.

Рассмотрена кинетика движения шарнирного ножа для случая скользящего контакта криволинейного лезвия ножа с поверхностью ветки (рис. 2).



Р и с. 2. Схема контакта шарнирного ножа с криволинейным лезвием с веткой

Fig. 2. Diagram of the contact between a free-swinging knife with a curved blade and a branch

Примечание: β – угол положения оси шарнира относительно центра ротора (фиксированный конструктивный параметр), °; γ_0 – начальный угол между касательной к спирали и радиусом (угол атаки в момент первого касания), °; γ_1 – текущий угол между касательной к спирали и радиусом (динамически меняющийся угол скольжения в процессе резания), °; F_{cb} – равнодействующая центробежной силы, прижимающая нож к ветке и продвигающая его по спирали, Н.

Note: β – the angle of the pivot axis relative to the rotor center (a fixed design parameter), °; γ_0 – the initial angle between the tangent to the spiral and the radius (the angle of attack at the moment of first contact), °; γ_1 – the current angle between the tangent to the spiral and the radius (the dynamically changing sliding angle during cutting), °; F_{cb} – the resultant centrifugal force that presses the knife against the branch and propels it along the spiral, N.

Под углом атаки понимается угол между режущей кромкой и направлением движения ножа относительно ветки; угол скольжения – угол между направлением силы резания и нормалью к лезвию, определяющий компоненту скольжения при резании; угол врезания – угол между лезвием и нормалью к поверхности ветки в момент начала резания.

Далее для каждого сочетания параметров выполнили расчет динамики ножа путем численного интегрирования системы уравнений (1)–(8) методом Рунге – Кутты 4-го порядка с фиксированным шагом интегрирования $\Delta t = 1 \cdot 10^{-5}$ с. Временной интервал моделирования выбирался достаточным для завершения процесса резания (0–0,2 с). Результатом моделирования являлись временные зависимости угла поворота ножа $\delta\alpha(t)$, силы резания $F_{rez}(t)$ и координат точки контакта.

В разработанной математической модели процесс взаимодействия ножа с веткой моделируется следующим образом. В начальный момент времени нож точкой A касается поверхности ветки. При вращении ротора против часовой стрелки с частотой ω в точке контакта возникает сила сопротивления F_{comp} , которая приводит к повороту ножа вокруг оси крепления шарнира O по часовой стрелке на угол $\delta\alpha$. Точка A поверхности ножа перемещается в положение A' . Радиус вращения точки A' относительно точки C вращения ротора уменьшается и поворачивается на угол ξ . В результате поворота возникает равнодействующая сил: центробежной F_{cbl} и натяжения полотна ножа. Она направлена против силы сопротивления F_{comp} , которая вызвана контактом с веткой. Как только равнодействующая сил становится равной по величине силе сопротивления F_{comp} , поворот ножа вокруг оси шарнира прекращается, нож начинает врезаться в ветку, а возникший угол скольжения ножа снижает необходимое для разрушения ветки усилие резания. Поскольку сечение ветки изменяется по мере врезания лезвия ножа, угол поворота ножа вокруг оси шарнира также изменяется.

Силовое взаимодействие ножа с веткой описали выражением:

$$F_{ud} + F_{cb}(\delta\alpha) + F_{spr}(\delta\alpha) \geq F_{comp}(\delta\alpha) = F_{rez}, \quad (1)$$

где F_{ud} – сила удара ножа, Н; F_{cb} – равнодействующая сил центробежной силы и силы натяжения полотна ножа, Н; $\delta\alpha$ – угол поворота ножа, °; F_{spr} – проекция силы пружины на касательную к окружности вращения в точке A' , Н; F_{rez} – сила резания, Н.

Сила удара ножа по ветке F_{ud} :

$$F_{ud} = K_{ud} \left(\frac{M_n \omega R_1(\delta\alpha)}{\tau_{ud}} \right), \quad (2)$$

где K_{ud} – коэффициент поглощения удара ($0 \leq K_{ud} \leq 1$); M_n – масса ножа, кг; ω – частота вращения ротора, с^{-1} ; τ_{ud} – время удара, с; $R_1(\delta\alpha)$ – радиус точки контакта ножа и ветки в зависимости от угла поворота ножа $\delta\alpha$, м:

$$R_1(\delta\alpha) = (a^2 + b^2 - 2ab \cdot \cos(\pi - \alpha))^{0.5}. \quad (3)$$

Равнодействующую сил центробежной силы и силы натяжения полотна ножа $F_{cb}(\delta\alpha)$ нашли по формуле

$$F_{cb}(\delta\alpha) = M_n \omega^2 R_1(\delta\alpha) \operatorname{tg}(\gamma(\delta\alpha)), \quad (4)$$

где

$$\gamma(\delta\alpha) = \frac{\arcsin(b \cdot \sin(\pi - \delta\alpha))}{R_1(\delta\alpha)}, \quad (5)$$

$$b = |OC| = R_0 - a, \quad (6)$$

$$a = |AO|. \quad (7)$$

Проекция силы пружины на касательную к окружности вращения в точке F_{spr} равна

$$F_{spr}(\delta\alpha) = F_{spr} \cdot \sin(\delta\alpha). \quad (8)$$

Для учета упругих свойств пружинного механизма использовалась линейная модель упругости, описывающая зависимость силы упругости пружины от ее деформации. Жесткость пружины являлась одним из варьируемых параметров при проведении численных экспериментов.

Решение системы уравнений силового баланса осуществлялось численными методами с использованием программного комплекса Mathcad³. Для этого были разработаны специализированные программы, позволяющие рассчитывать динамические характеристики шарнирного ножа в зависимости от различных параметров: частоты вращения ротора, жесткости пружины, геометрии режущей кромки и физико-механических свойств материала ветви. Учтены предел прочности при срезе, плотность древесины и модуль упругости; значения указанных характеристик приняты по данным экспериментальных исследований физико-механических свойств однолетней древесины виноградной лозы [13].

На рисунке 3 приведены тексты программ расчета усилия разрушения, на рисунке 4 – расчета угла поворота ножа и координат смещения точки контакта ножа и ветки.

Следующим этапом исследования было построение на основе полученных данных графиков зависимостей максимального угла отклонения ножа $\delta\alpha_{\max}$ от частоты вращения ротора ω при различных значениях усилия пружины F_{spr} . Проанализировали траектории движения точки контакта ножа с веткой для прямолинейного и спиралевидного ножа. Сравнили величины силы резания $F_{рез}$ и угла отклонения $\delta\alpha$ для обоих типов ножей при одинаковых режимных параметрах.

³ Бурьков Д.В. Mathcad, MATLAB, MATLAB Simulink, Scilab в электротехнике: учеб. пособие. Ростов-на-Дону: Южный федеральный университет; 2021. 171 с.

$$\begin{aligned} & r \leftarrow \frac{D}{2} \cdot 1000 \\ & R \leftarrow R0 \cdot 1000 \\ & d11 \leftarrow d \cdot 1000 \\ & k \leftarrow \tan(t \cdot \omega) \\ & x \leftarrow 0 \\ & x1 \leftarrow \text{root}[(x-R)^2 + (k \cdot x - r)^2 - r^2, x] \\ & \text{FrezXX}(t) := \begin{cases} y1 \leftarrow k \cdot x1 \\ x \leftarrow 2 \cdot R \\ x2 \leftarrow \text{root}[(x-R)^2 + (k \cdot x - r)^2 - r^2, x] \\ y2 \leftarrow k \cdot x2 \\ b12 \leftarrow \sqrt{(x1-x2)^2 + (y1-y2)^2} \\ S \leftarrow b12 \cdot d11 \\ F_{\text{spr}} \leftarrow \sigma r \cdot S \cdot 10^{-6} \end{cases} \end{aligned}$$

Усилие
разрушения, Н /
Breaking force, Н

a)

$$\begin{aligned} & r \leftarrow \frac{D}{2} \cdot 1000 \\ & R \leftarrow R0 \cdot 1000 \\ & d11 \leftarrow d \cdot 1000 \\ & \text{FrezXX}(t) := \begin{cases} k \leftarrow \tan(t \cdot \omega) \\ x \leftarrow 0 \\ x1 \leftarrow \text{root}[(x-R)^2 + (k \cdot x - r)^2 - r^2, x] \\ y1 \leftarrow k \cdot x1 \end{cases} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & x \leftarrow 2 \cdot R \\ & x2 \leftarrow \text{root}[(x-R)^2 + (k \cdot x - r)^2 - r^2, x] \\ & y2 \leftarrow k \cdot x2 \\ & b12 \leftarrow \sqrt{(x1-x2)^2 + (y1-y2)^2} \\ & S \leftarrow b12 \cdot d11 \\ & F_{\text{spr}} \leftarrow \sigma r \cdot S \cdot 10^{-6} \cdot K_{wr}(40, 80) \end{aligned}$$

b)

Р и с. 3. Программа расчета усилия разрушения:
а) при действии силы, перпендикулярной к линии реза; б) при скользящем резании

F i g. 3. Program for calculating the breaking force:
а) under the action of a force perpendicular to the cutting line; б) during sliding cutting

Источник: рисунки 3, 4 составлены авторами статьи в программе Mathcad.

Source: Figures 3, 4 were compiled by the authors of the article in the program Mathcad.

<pre> Alfa := i ← 0 for t ∈ 0, $\frac{Tb}{500}$..Tb α ← 0 rez ← root(FcbS(α) – FrezXX(t), α) alfa_{i,0} ← t alfa_{i,1} ← rez alfa_{i,2} ← a · sin(rez) alfa_{i,3} ← a · cos(rez) i ← i + 1 alfa Угол поворота ножа при резании и координаты смещения точки контакта ножа с веткой / The knife rotation angle in cutting and the coordinates of the displacement of the contact point between the knife and branch </pre> a)	<pre> Alfa := i ← 0 for t ∈ 0, $\frac{Tb}{500}$..Tb α ← 0 rez ← 0 if FcbS(α) > FrezXX(t) otherwise α ← 0 rez ← root(FcbS(α) – FrezXX(t), α) alfa_{i,0} ← t alfa_{i,1} ← rez alfa_{i,2} ← a · (sin(rez + α0) – sin(α0)) alfa_{i,3} ← a · (cos(α0) – cos(rez + α0)) i ← i + 1 alfa </pre> b)
--	---

- Р и с. 4. Программа расчета угла поворота ножа:
- a) при действии силы, перпендикулярной к линии реза; b) при скользящем резании
- F i g. 4. The program for calculating the knife rotation angle:
- a) under the action of a force perpendicular to the cutting line; b) when sliding cutting

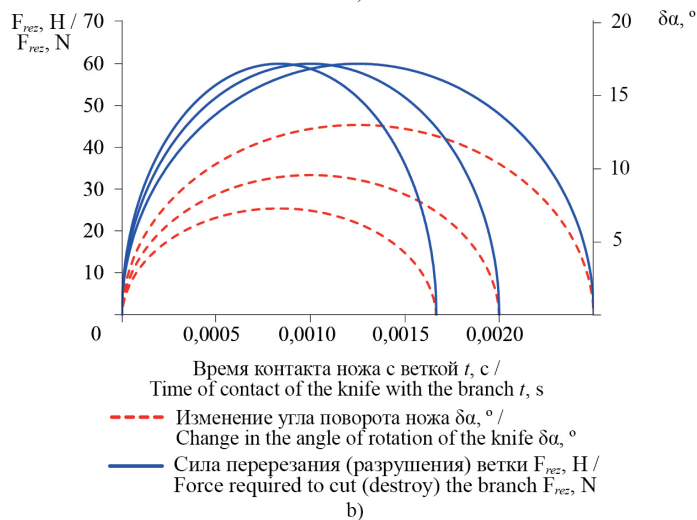
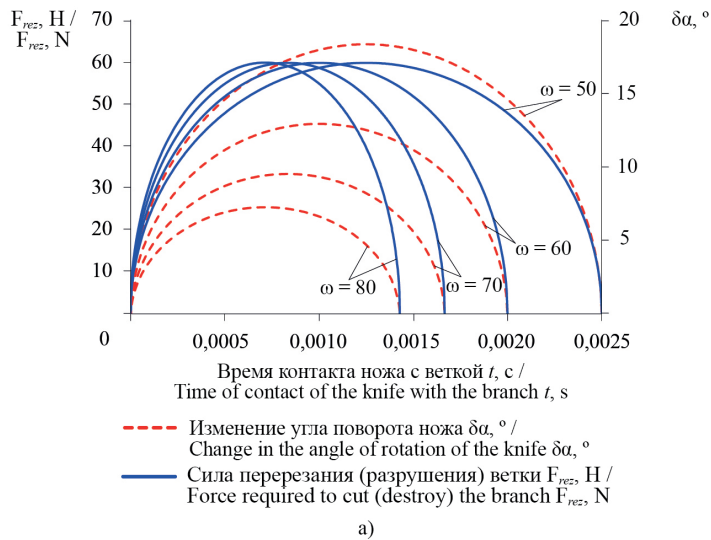
Путем сравнения полученных характеристик для различных комбинаций параметров определили диапазоны частот вращения ротора и усилия пружины, обеспечивающих минимальные ударные нагрузки и стабильное качество среза для каждого типа ножа. Критериями оптимальности являлись: минимальное значение максимальной силы резания F_{rez} , минимальные колебания угла отклонения ножа $\delta\alpha(t)$ и равномерность траектории точки контакта.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Получены зависимости угла отклонения ножа $\delta\alpha$ от частоты вращения ротора при различных значениях жесткости пружины и геометрии режущей кромки (рис. 5, 6).

Исследование траекторий точки контакта ножа с ветвью (рис. 7, 8) позволило оценить характер взаимодействия режущего инструмента с материалом и определить оптимальные параметры геометрии режущей кромки. Установлено, что при геометрии, соответствующей спиральному ножу (табл.), траектория точки контакта приближается к прямой линии, что свидетельствует о более равномерном резании и снижении ударных нагрузок.

На основе проведенного параметрического анализа были определены оптимальные режимы работы шарнирного механизма, обеспечивающие снижение ударных нагрузок и повышение качества среза. Оптимальный диапазон частот вращения ротора составляет $28\text{--}36\text{ с}^{-1}$, а оптимальное усилие пружины находится в пределах $100\text{--}200\text{ Н}$. В диапазоне частот вращения ротора $28\text{--}36\text{ с}^{-1}$ и усилия пружины $100\text{--}200\text{ Н}$ достигается минимальный уровень вибраций и обеспечивается стабильное резание ветвей различного диаметра.



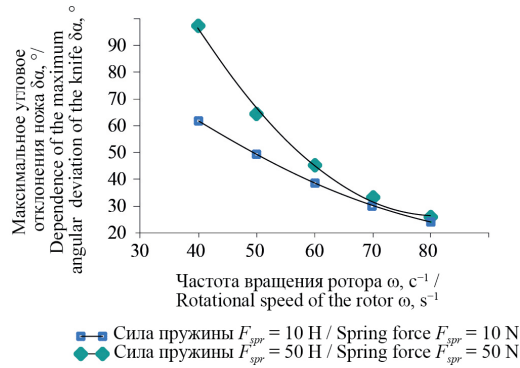
Р и с. 5. Изменение угла $\delta\alpha$ поворота ножа и необходимой для перерезания (разрушения) ветки силы $F_{рез}$ в зависимости от времени контакта ножа с веткой при силе пружины:

a) $F_{spr} = 10$ H; б) $F_{spr} = 50$ H

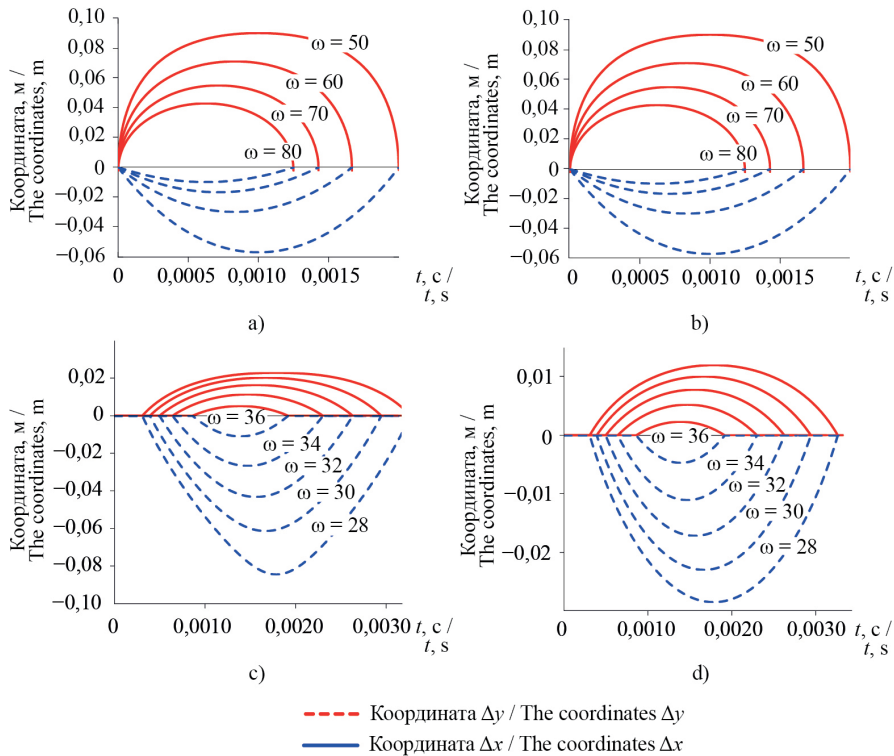
F i g. 5. Change in the angle $\delta\alpha$ of the knife rotation and the Frez force required to cut (destroy) the branch, depending on the time of contact between the knife and the branch at a spring force:

a) $F_{spr} = 10$ N; б) $F_{spr} = 50$ N

Источник: графики для рисунков 5–8 составлены авторами статьи в программе Mathcad.
Source: Figures 5–8 were compiled by the authors of the article in the software Mathcad.



Р и с. 6. Зависимость максимального углового отклонения ножа от частоты вращения ротора
 Fig. 6. The dependence of the maximum angular deviation of the knife on the rotor speed

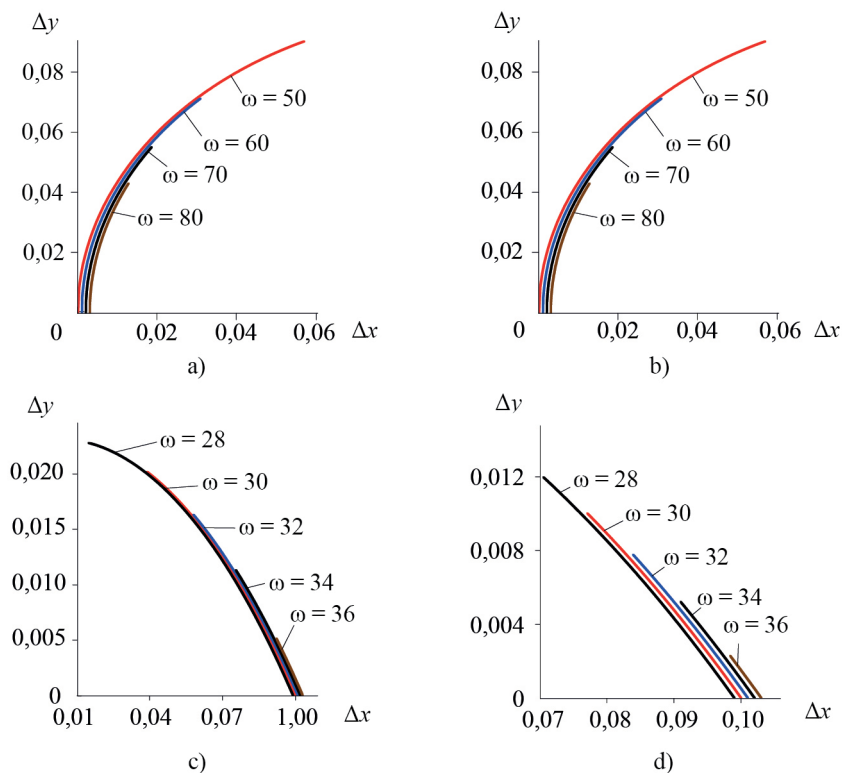


Р и с. 7. Значения координат точки контакта ножа и ветки в зависимости от времени контакта ножа и ветки при силе пружины:

a) $F_{spr} = 10$ Н; б) $F_{spr} = 50$ Н; в) $F_{spr} = 100$ Н; д) $F_{spr} = 200$ Н

Fig. 7. The coordinates of the contact point between the knife and the branch depending on the time of contact between the knife and the branch at spring force:

a) $F_{spr} = 10$ N; б) $F_{spr} = 50$ N; в) $F_{spr} = 100$ N; д) $F_{spr} = 200$ N



Р и с. 8. Траектория смещения точки контакта при силе пружины:

a) $F_{spr} = 10$ Н; б) $F_{spr} = 50$ Н; в) $F_{spr} = 100$ Н; д) $F_{spr} = 200$ Н

F i g. 8. The trajectory of the contact point displacement at a spring force:

a) $F_{spr} = 10$ N; б) $F_{spr} = 50$ N; в) $F_{spr} = 100$ N; д) $F_{spr} = 200$ N

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные в ходе численного моделирования результаты позволяют интерпретировать динамику шарнирных ножей с криволинейной кромкой в ротационных обрезочных аппаратах. Установлено, что использование спиралевидной формы лезвия вместо прямолинейной принципиально меняет характер взаимодействия инструмента с веткой: ударное нагружение, характерное для прямых ножей, заменяется скользящим плавным врезанием. Это подтверждается траекториями точки контакта (рис. 7, 8): для спиралевидного ножа траектория приближается к прямой линии, что свидетельствует о более равномерном и стабильном резании. Сравнительный анализ показал, что спиралевидный нож обеспечивает снижение пиковых усилий резания $F_{рез}$ на 25–30 % по сравнению с прямолинейным при одинаковых режимных параметрах.

Полученные результаты согласуются с предыдущими исследованиями, в которых было показано, что геометрия и кинематика режущего инструмента существенно влияют на усилие обрезки садов и виноградников [18]; и выводами о преимуществах скользящего резания для анизотропных материалов [1]. Они дополняют представления об оптимальной скорости резания, при которой исключается чрезмерная деформация материала [14], показывая, что аналогичный эффект достигается не

только за счет выбора скорости, но и за счет геометрической адаптации лезвия (криволинейная форма и шарнирное крепление). В отличие от традиционных жестко закрепленных ножей, предлагаемая конструкция позволяет автоматически регулировать угол атаки в процессе резания, что обеспечивает адаптацию к изменяющемуся сопротивлению материала ветки. Сходство с рассмотренными подходами [2; 3] заключается в использовании шарнирного механизма, однако новизна текущего исследования состоит в комплексном учете взаимовлияния геометрии лезвия, упругих свойств пружины и режимных параметров на динамику ножа.

Следует отметить ограничения предложенной модели. Модель предполагает абсолютно жесткий нож и изотропные свойства материала ветки, что является упрощением реальных условий. В действительности древесина виноградной лозы обладает анизотропией, и в процессе резания возможны упругие деформации ножа. Кроме того, модель не учитывает динамику привода ротора и возможные резонансные явления. Сильной стороной исследования является разработка универсальной математической модели, позволяющей проводить параметрический анализ для различных геометрических и режимных параметров. Модель может быть адаптирована для других типов растительных материалов путем замены физико-механических характеристик. Однако отсутствие экспериментальной верификации полученных результатов определяет необходимость дальнейших исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Спиралевидная форма ножа обеспечивает более плавное и равномерное резание за счет скользящего вхождения в материал. Шарнирные ножи с пружинным натяжителем, удерживающим нож в направлении наибольшего радиуса вращения, позволяют существенно улучшить условия резания веток различного сечения. Такая конструкция обеспечивает адаптацию к изменяющимся условиям резания и снижает ударные нагрузки.

Для выбранных значений геометрических и массовых характеристик роторного шарнирного ножа установлены диапазоны рабочих частот вращения ротора и усилия пружины, обеспечивающие эффективное резание веток: для шарнирного линейного ножа прямого удара – $\omega = 40...80 \text{ с}^{-1}$, $F_{spr} = 10...50 \text{ Н}$; для шарнирного спирального ножа скользящего удара – $\omega = 28...36 \text{ с}^{-1}$, $F_{spr} = 100...200 \text{ Н}$.

Основной вклад работы заключается в разработке математической модели силового баланса шарнирного ножа с криволинейной режущей кромкой, учитывающей взаимовлияние геометрических, кинематических и упругих параметров. Впервые на основе количественного анализа показано, что спиралевидная форма лезвия в сочетании с шарнирным креплением позволяет снизить пиковые ударные нагрузки по сравнению с прямолинейными ножами за счет реализации принципа скользящего резания с автоматической адаптацией угла атаки.

Возможность применения полученных результатов для оптимизации конструктивных параметров ротационных обрезочных аппаратов позволит повысить их надежность, сократить энергозатраты и обеспечить высокое качество обрезки многолетних насаждений. Разработанная модель может служить инструментом для оптимизации конструктивных параметров режущих органов. Дальнейшие исследования должны быть направлены на экспериментальную проверку полученных

результатов, оптимизацию конструкции шарнирного механизма с учетом реальных условий эксплуатации, а также разработку системы автоматического управления, обеспечивающей поддержание оптимальных режимов работы в зависимости от диаметра и физико-механических свойств ветвей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Allegro G., Martelli R., Valentini G., Pastore Ch., Mazzoleni R., Pezzi F., et al. Effects of Mechanical Winter Pruning on Vine Performances and Management Costs in a Trebbiano Romagnolo Vineyard: A Five-Year Study. *Horticulturae*. 2023;9(1):21. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9010021>
2. Гайнуллин Р.Х., Гайнуллин Р.Х., Чемоданов А.Н., Царев Е.М., Рукомойников К.П., Смирнов М.Ю. и др. О закономерности изменения силовых характеристик при криволинейном строгании древесины на шпон. *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия «Материалы. Конструкции. Технологии»*. 2022;2(22):51–57. <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2022.2.51>
3. Красовский В.В., Трофимов И.М., Гербер Ю.Б., Федоров Б.К. Сравнительный анализ эффективности режущих инструментов для обрезки виноградной лозы. *Известия сельскохозяйственной науки Тавриды*. 2025;44(207):101–113. <https://elibrary.ru/dfjywl>
4. Liu Z., Wang T., Liu S., Yan X., Zhao H., Wu X., et al. Design and Experimental Study of a Bionic Blade for Harvesting the Wild Chrysanthemum Stem. *Agriculture*. 2023;13(1):190. <https://doi.org/10.3390/agriculture13010190>
5. Wu B., Zuo T., Li Z., Qian H., Huang T., Xiang Y. Numerical Simulation and Optimization of the Airflow Field of a Forage Drum Mower. *Applied Sciences*. 2023;13(10):5910. <https://doi.org/10.3390/app13105910>
6. Egorov A.V., Shram V.G., Kaizer Yu.F., Zhelukevich R.B., Lysyannikov A.V., Bezborodov Yu.N., et al. Dynamic Control of the Efficiency of Mechanic Cutting of Material. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2023;52(5):432–435. <https://doi.org/10.3103/S1052618823050047>
7. Апхулов Т.М., Апажев А.К., Шекихачев Ю.А. Обоснование основных конструктивных и технологических параметров измельчителя ветвей плодовых деревьев. *Международный технико-экономический журнал*. 2019;(4):15–19. <https://doi.org/10.34286/1995-4646-2019-67-4-15-19>
8. Красовский В.В., Трофимов И.М., Завалий А.А. Теоретический анализ режущего инструмента ротационно-ножевого типа для обрезки многолетних растений. *Известия сельскохозяйственной науки Тавриды*. 2025;43(206):172–181. <https://elibrary.ru/xzggopd>
9. Danylchenko Yu., Storchak M., Danylchenko M., Petryshyn A. Cutting Process Consideration in Dynamic Models of Machine Tool Spindle Units. *Machines*. 2023;11(6):582. <https://doi.org/10.3390/machines11060582>
10. Sharma A., Thapa S., Goel B., Kumar R., Singh T. Structural Analysis and Optimization of Machine Structure for the Measurement of Cutting Force for Wood. *Alexandria Engineering Journal*. 2023;(64):833–846. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.09.030>
11. Lv J., Jia S., Wang H., Ding K., Chan F.T.S. Comparison of Different Approaches for Predicting Material Removal Power in Milling Process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021;(116):213–227. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07257-2>
12. Gutnichenko O., Nilsson M., Lindvall R., Bushlya V., Andersson M. Improvement of Tool Utilization when Hard Turning with cBN Tools at Varying Process Parameters. *Wear*. 2021;(477):203900. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203900>
13. Красовский В.В., Гербер Ю.Б. Экспериментальное исследование и оптимизация скорости резания для повышения эффективности малогабаритного дискового измельчителя растительных остатков. *Инженерные технологии и системы*. 2025;35(1):84–100. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202501.084-100>
14. Гаранин В.Н., Болочко Д.Л. Обоснование скорости резания древесины с использованием модели обработки анизотропного материала. *Труды БГТУ. Серия I: Лесное*

- хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2020;(2):299–305. URL: <https://elib.belstu.by/handle/123456789/34848> (дата обращения: 24.11.2025).
15. Liu B., Wang Y., Zhao G., Yang D., Huang D., Xiang B. Intelligent Decision Method for Main Control Parameters of Tunnel Boring Machine Based on Multi-Objective Optimization of Excavation Efficiency and Cost. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2021;(116):104054. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104054>
 16. Егоров А.В., Шрам В.Г., Кайзер Ю.Ф., Желукевич Р.Б., Лысянников А.В., Безбородов Ю.Н. и др. Динамический метод контроля эффективности резания материала механическим способом. *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2023;(5):3–6. <https://doi.org/10.31857/S0235711923050048>
 17. Красовский В.В., Гербер Ю.Б. Оптимизация параметров малогабаритного измельчителя растительных материалов с использованием регрессионного моделирования. *Известия сельскохозяйственной науки Тавриды*. 2025;(41):141–152. <https://elibrary.ru/ikhtcr>
 18. Красовский В.В., Трофимов И.М., Завалий А.А., Гербер Ю.Б. Влияние геометрии и кинематики режущего инструмента на усилие обрезки садов и виноградников: теоретический и численный анализ. *Таврический вестник аграрной науки*. 2026;(1):66–79. <https://doi.org/10.5281/zenodo.19216701>

REFERENCES

1. Allegro G., Martelli R., Valentini G., Pastore Ch., Mazzoleni R., Pezzi F., et al. Effects of Mechanical Winter Pruning on Vine Performances and Management Costs in a Trebbiano Romagnolo Vineyard: A Five-Year Study. *Horticulturae*. 2023;9(1):21. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9010021>
2. Gainullin R.Kh., Gainullin R.Kh., Chemodanov A.N., Tsarev E.M., Rukomoynikov K.P., Smirnov M.Yu., et al. On the Pattern of Change in Force Characteristics During Curvilinear Wood Planing for Veneer. *Bulletin of Volga State University of Technology. Series: Materials. Constructions. Technologies*. 2022;2(22):51–57. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2022.2.51>
3. Krasovskiy V.V., Trofimov I.M., Gerber Yu.B., Fedorov B.K. Comparative Analysis of the Effectiveness of Cutting Tools for Pruning Grape Vines. *Transactions of Taurida Agricultural Science*. 2025;44(207):101–113. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/dfjywl>
4. Liu Z., Wang T., Liu S., Yan X., Zhao H., Wu X., et al. Design and Experimental Study of a Bionic Blade for Harvesting the Wild Chrysanthemum Stem. *Agriculture*. 2023;13(1):190. <https://doi.org/10.3390/agriculture13010190>
5. Wu B., Zuo T., Li Z., Qian H., Huang T., Xiang Y. Numerical Simulation and Optimization of the Airflow Field of a Forage Drum Mower. *Applied Sciences*. 2023;13(10):5910. <https://doi.org/10.3390/app13105910>
6. Egorov A.V., Shram V.G., Kaizer Yu.F., Zhelukevich R.B., Lysyannikov A.V., Bezborodov Yu.N., et al. Dynamic Control of the Efficiency of Mechanic Cutting of Material. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2023;52(5):432–435. <https://doi.org/10.3103/S1052618823050047>
7. Apkhudov T.M., Apazhev A.K., Shekikhachev Yu.A. Justification of the Main Design and Technological Parameters of a Fruit Tree Branch Shredder. *International Technical and Economic Journal*. 2019;(4):15–19. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.34286/1995-4646-2019-67-4-15-19>
8. Krasovskiy V.V., Trofimov I.M., Zavaliy A.A. Theoretical Analysis of a Rotary-Knife Type Cutting Tool for Pruning Perennial Plants. *Transactions of Taurida Agricultural Science*. 2025;43(206):172–181. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/xzggopd>
9. Danylchenko Yu., Storchak M., Danylchenko M., Petryshyn A. Cutting Process Consideration in Dynamic Models of Machine Tool Spindle Units. *Machines*. 2023;11(6):582. <https://doi.org/10.3390/machines11060582>
10. Sharma A., Thapa S., Goel B., Kumar R., Singh T. Structural Analysis and Optimization of Machine Structure for the Measurement of Cutting Force for Wood. *Alexandria Engineering Journal*. 2023;(64):833–846. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.09.030>

11. Lv J., Jia S., Wang H., Ding K., Chan F.T.S. Comparison of Different Approaches for Predicting Material Removal Power in Milling Process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021;(116):213–227. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07257-2>
12. Gutnichenko O., Nilsson M., Lindvall R., Bushlya V., Andersson M. Improvement of Tool Utilization when Hard Turning with cBN Tools at Varying Process Parameters. *Wear*. 2021;(477):203900. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203900>
13. Krasovskiy V.V., Gerber Yu.B. Experimental Study and Optimization of Cutting Speed to Improve the Efficiency of a Small-Sized Disc Shredder of Plant Residues. *Engineering Technologies and Systems*. 2025;35(1):84–100. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202501.084-100>
14. Garanin V.N., Bolochko D.L. Justification of Wood Cutting Speed Using a Model of Anisotropic Material Processing. *Proceedings of BSTU. Series I: Forestry, Nature Management and Processing of Renewable Resources*. 2020;(2):299–305. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://elib.belstu.by/handle/123456789/34848> (accessed 24.11.2025).
15. Liu B., Wang Y., Zhao G., Yang D., Huang D., Xiang B. Intelligent Decision Method for Main Control Parameters of Tunnel Boring Machine Based on Multi-Objective Optimization of Excavation Efficiency and Cost. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2021;(116):104054. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104054>
16. Egorov A.V., Shram V.G., Kaizer Yu.F., Zhelukevich R.B., Lysyannikov A.V., Bezborodov Yu.N., et al. Dynamic Method for Monitoring the Efficiency of Mechanical Material Cutting. *Problems of Mechanical Engineering and Machine Reliability*. 2023;(5):3–6. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.31857/S0235711923050048>
17. Krasovskiy V.V., Gerber Yu.B. Optimization of Parameters of a Small-Sized Plant Material Grinder Using Regression Modeling. *Transactions of Taurida Agricultural Science*. 2025;(41):141–152. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/ikhtcr>
18. Krasovskiy V.V., Trofimov I.M., Zavaliy A.A., Gerber Yu.B. Influence of Cutting Tool Geometry and Kinematics on the Process of Pruning Orchards and Vineyards: Theoretical and Numerical Analysis. *Taurida Herald of the Agrarian Sciences*. 2026;(1):66–79. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.5281/zenodo.19216701>

Об авторах:

Красовский Виталий Викторович, доцент кафедры общетехнических дисциплин Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского (295007, Российская Федерация, г. Симферополь, пр. Вернадского, д. 4); кандидат технических наук, заведующий отделом механизации производства и разработки новых образцов техники Научно-исследовательского института сельского хозяйства Крыма (295043, Российская Федерация, г. Симферополь, ул. Киевская, д. 150), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5556-9531>, Researcher ID: KFB-1012-2024, SPIN-код: 4234-0138, vitaliy-krasovskiy@mail.ru

Трофимов Илья Михайлович, аспирант кафедры технических систем в агробизнесе института агротехнологической академии Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского (295007, Российская Федерация, г. Симферополь, пр. Вернадского, д. 4), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1738-6910>, iliyaxz@mail.ru

Завалий Алексей Алексеевич, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой общетехнических дисциплин института агротехнологической академии Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского (295007, Российская Федерация, г. Симферополь, пр. Вернадского, д. 4), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0806-1110>, zavalym@mail.ru

Вклад авторов:

В. В. Красовский – формулирование идеи исследования, целей и задач; разработка методологии исследования; применение статистических, математических, вычислительных или других формальных методов для анализа или синтеза данных исследования; создание и подготовка рукописи: написание черновика рукописи, включая его перевод на иностранный язык.

И. М. Трофимов – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов или сбор данных; программирование, разработка и проектирование программного обеспечения; деятельность по аннотированию (созданию метаданных), очистке данных и поддержанию их целостности (включая программный код для интерпретации, где это необходимо) для первоначального и повторного использования; создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования и полученных данных.

А. А. Завалий – контроль, лидерство и наставничество в процессе планирования и проведения исследования; проверка воспроизводимости результатов экспериментов и исследования в рамках основных или дополнительных задач работы; создание и подготовка рукописи: критический анализ черновика рукописи, внесение замечаний и исправлений членами исследовательской группы, в том числе на этапах до и после публикации; рецензирование и редактирование текста рукописи.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 27.09.2025; поступила после рецензирования 23.01.2026;
принята к публикации 09.02.2026*

About the authors:

Vitaliy V. Krasovskiy, Associate Professor of the Department of General Technical Disciplines, V. I. Vernadsky Crimean Federal University (4 Vernadsky Ave., Simferopol 295007, Russian Federation); Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department of Mechanization of Production and Development of New Types of Equipment, Research Institute of Agriculture of Crimea (150 Kievskaya St., Simferopol 295043, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5556-9531>, Researcher ID: KFB-1012-2024, SPIN-code: 4234-0138, vitaliy-krasovskiy@mail.ru

Ilya M. Trofimov, Post-Graduate Student of the Department of Technical Systems in Agribusiness, V. I. Vernadsky Crimean Federal University (4 Vernadsky Ave., Simferopol 295007, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1738-6910>, iliyaxz@mail.ru

Aleksey A. Zavaliiy, Dr.Sci. (Eng.), Associate professor, Head of the Department of General Technical Disciplines, V. I. Vernadsky Crimean Federal University (4 Vernadsky Ave., Simferopol 295007, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0806-1110>, zavalym@mail.ru

Authors contribution:

V. V. Krasovskiy – ideas; formulation or evolution of overarching research goals and aims, development of methodology; application of statistical, mathematical, computational, or other formal techniques to analyses or synthesize study data; creation of the published work, specifically writing the initial draft (including substantive translation).

I. M. Trofimov – conducting a research and investigation process, specifically performing the experiments, or data collection; programming, software development; designing computer programs; management activities to annotate (produce metadata), scrub data and maintain research data (including software code, where it is necessary for interpreting the data itself) for initial use and later re-use; preparation, creation of the published work, specifically visualization.

A. A. Zavaliiy – oversight and leadership responsibility for the research activity planning and execution, including mentorship external to the core team; verification, whether as a part of the activity or separate, of the overall replication / reproducibility of results / experiments and other research outputs; preparation, creation and presentation of the published work by those from the original research group, specifically critical review, commentary or revision – including pre- or post-publication stages.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 27.09.2025; revised 23.01.2026; accepted 09.02.2026

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ / TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT



<https://doi.org/10.15507/2658-4123.26363.483-499>

EDN: <https://elibrary.ru/ivzfes>

УДК / UDK 631.3:633.358:004.9:519.854

Оригинальная статья / Original article

Parameters of the Digital Twin Model of Peas for Modeling Using the Discrete Element Method

A. M. Mukhametdinov✉, S. G. Mudarisov, I. R. Miftakhov

Bashkir State Agrarian University,

Ufa, Russian Federation, <https://ror.org/02y6ewg31>

✉ airat102@mail.ru

Abstract

Introduction. In the context of developing energy-saving technologies and machines based on digital twins, the use of the discrete element method for modeling the technological process of sowing is the most in-demand area. The key advantage of DEM modeling is the ability to minimize the cost of creating new technology through virtual testing and optimization. The quality of the sowing machines is known to directly affect the uniformity of sowing and, ultimately, the yield. Therefore, the creation of adequate digital twins taking into account the physical and mechanical properties of real seeds is an important scientific and practical task. To model the process of sowing peas, it is necessary to solve two main tasks: to select an adequate contact model and calibrate its parameters that is the main aim of this work.

Aim of the Study. The study is aimed at determining the parameters of the contact model of a digital twin of pea seeds for modeling using the discrete element method.

Materials and Methods. The object of the study is the calibration of the parameters of the Linear Spring Dashpot contact model applied to pea seeds. The stages of the study include: identifying the limitations of calibration methods when modeling seed movement; determining the effect of moisture content and fractional composition of pea seeds on friction coefficients; developing a method for calibrating the contact model taking into account force impact in conditions close to the sowing machine operation; verifying models by comparing DEM modeling with data from field experiments in a coil apparatus.

Results. There has been determined the fractional composition of pea seeds showing pronounced polydispersity of the material. The dominant fraction (83.4%) has a diameter of 6.0–7.0 mm, which has been taken into account when parameterizing the DEM model in the Rocky DEM software package to create a representative digital twin. The significant influence of seed moisture content on their friction properties has been experimentally proven. With an increase in moisture content from 9% to 23%, the coefficient of dynamic friction increases that leads to a regular increase in the torque on the sowing machine shaft from 0.3 to 1.0 N·m. There has been developed and tested a comprehensive calibration method using the torque on the shaft of the sowing machine as a compliance

© Mukhametdinov A.M., Mudarisov S.G., Miftakhov I.R., 2026



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

criterion. There has been defined the range of the main parameters of the Linear spring dashpot contact model, ensuring high modeling accuracy: the coefficient of dynamic friction between seeds $k_d = 0.14 \dots 0.16$; the coefficient of dynamic friction of seeds with the walls of the device $k_{d,k} = 0.07 \dots 0.09$. Based on the results of the experiments, there has been developed a nomogram for selecting the dynamic friction coefficient depending on the moisture content of pea seeds.

Conclusion. The use of the proposed calibration method based on torque allows the creation of high-precision digital twins suitable for optimizing the design and technological parameters of sowing machines that contributes to improving the quality of sowing and saving resources in agricultural production.

Keywords: contact model, torque, dynamic friction coefficient, fractional composition, pea seeds, digital twin, discrete element modeling

Funding: The work was carried out with the support of a grant from the Russian Science Foundation № 23-76-10070 (<https://rscf.ru/project/23-76-10070>).

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

For citation: Mukhametdinov A.M., Mudarisov S.G., Miftakhov I.R. Parameters of the Digital Twin Model of Peas for Modeling Using the Discrete Element Method. *Engineering Technologies and Systems*. 2026;36(3):483–499. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.26363.483-499>

Параметры модели цифрового двойника гороха для моделирования методом дискретных элементов

А. М. Мухаметдинов✉, С. Г. Мударисов, И. Р. Мифтахов

Башкирский государственный аграрный университет,
г. Уфа, Российская Федерация, <https://ror.org/02y6ewg31>

✉ airat102@mail.ru

Аннотация

Введение. В контексте разработки энергосберегающих технологий и машин на основе цифровых двойников наиболее востребованным для моделирования технологического процесса посева является метод дискретных элементов. Его преимущество – минимизация затрат на создание новой техники за счет виртуального тестирования и оптимизации. Ключевой задачей является преодоление масштабного разрыва между физико-механическими свойствами семян и макроскопическими показателями качества работы высевашевого аппарата. Создание адекватных цифровых двойников, учитывающих свойства реальных семян, позволит повысить качество моделирования и точность прогнозирования, что является необходимым условием для последующего увеличения урожайности.

Цель исследования. Определение параметров контактной модели цифрового двойника семян гороха для моделирования методом дискретных элементов.

Материалы и методы. Объектом исследования является процесс калибровки параметров контактной модели Linear Spring Dashpot применительно к семенам гороха. Этапы проведения исследования включают: выявление ограничения методов калибровки при моделировании движения семян; определение влияния влажности и фракционного состава семян на коэффициенты трения; разработку методики калибровки контактной

модели с учетом силового воздействия в условиях, близких к работе высевающего аппарата; верификацию моделей путем сравнения DEM-моделирования с данными натурных экспериментов в катушечном аппарате.

Результаты исследования. Установлен фракционный состав семян гороха, показавший выраженную полидисперсность материала. Доминирующая фракция (83,4 %) имеет диаметр 6,0–7,0 мм, что учтено при параметризации DEM-модели в программном комплексе Rocky DEM для создания репрезентативного цифрового двойника. Экспериментально доказано существенное влияние влажности семян на их фрикционные свойства. С увеличением влажности от 9 до 23 % коэффициент динамического трения возрастает, что приводит к закономерному росту крутящего момента на валу высевающего аппарата с 0,3 до 1,0 Н·м. Разработана и апробирована комплексная методика калибровки, использующая в качестве критерия соответствия крутящий момент на валу высевающей катушки сеялки. Установлен диапазон основных параметров контактной модели Linear Spring Dashpot, обеспечивающий высокую точность моделирования: коэффициент динамического трения между семенами $k_d = 0,14 \dots 0,16$; коэффициент динамического трения семян со стенками аппарата $k_{dk} = 0,07 \dots 0,09$. Разработана номограмма выбора коэффициента динамического трения в зависимости от влажности семян гороха.

Заключение. Использование предложенной методики калибровки на основе крутящего момента позволяет создавать высокоточные цифровые двойники, пригодные для оптимизации конструктивно-технологических параметров высевающих аппаратов, что способствует повышению качества посева и ресурсосбережению в сельскохозяйственном производстве.

Ключевые слова: контактная модель, крутящий момент, коэффициент динамического трения, фракционный состав, семена гороха, цифровой двойник, моделирование методом дискретных элементов

Финансирование: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-76-10070 (<https://rscf.ru/project/23-76-10070>).

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Мухаметдинов А.М., Мударисов С.Г., Мифтахов И.Р. Параметры модели цифрового двойника гороха для моделирования методом дискретных элементов. *Инженерные технологии и системы*. 2026;36(3):483–499. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.26363.483-499>

INTRODUCTION

Discrete element modeling (DEM) is a modern approach to analyzing technological processes, including the sowing of agricultural crops. This area is particularly relevant in the context of developing energy-saving technologies and machines based on digital twins. A key advantage of DEM modeling is the ability to minimize the cost of creating new technology through virtual testing and optimization.

Peas are one of the main legume crops cultivated in the Republic of Bashkortostan, and their share in the structure of sown areas in some agricultural enterprises reaches 10%. However, the yield of this crop depends on the quality of the pea seeds. The quality of sowing equipment, as is well known, directly affects the uniformity of sowing and, ultimately, crop yields. Therefore, the creation of adequate digital twins that take into account the physical and mechanical properties of real seeds is an important scientific and practical task. To simulate the process of sowing peas, two main tasks must be

solved: selecting an adequate contact model and calibrating its parameters that is the main goal of this work.

Currently, considerable attention is being paid to calibrating the parameters of contact models in the DEM and improving the adequacy of digital twins of seeds created on its basis. The analysis of the literature shows that research is being conducted in several key areas.

The study is aimed at developing an improved method for calibrating the parameters of the contact model for pea seeds, which allows for the dynamic processes of particle interaction under the operating conditions of the reel seeder to be taken into account. The objectives of the study are: to identify the limitations of existing calibration methods (based on natural slope and collapse to determine experimentally the effect of moisture content and fractional composition of pea seeds on their friction properties (static and dynamic friction coefficients); to develop a method for calibrating the parameters of the contact model, integrating data on the force exerted on the seeds under conditions similar to those of the seeding machine; to verify the accuracy of the calibrated model by comparing DEM modeling data with the results of field experiments in a reel seeder.

LITERATURE REVIEW

A number of works, such as studies by C. Coetzee, J. Horabik, B. Ghodki are devoted to the direct calibration of parameters for specific agricultural materials [1–3]. In particular, B. M. Ghodki has successfully calibrated the models for legume seeds, showing that the results of modeling using the Hertz – Mindlin and *Linear spring-dashpot* models do not exceed the statistical error compared to the full-scale experiment that confirms the applicability of these models for creating digital twins [4].

Another area is related to the use of calibrated models for the design and optimization of working parts of agricultural machinery, as, for example, in the works of K. Bangura on the modeling of fertilizer spreaders [5] and X. Gao on the analysis of sowing machines, which demonstrates the influence of the physical and mechanical properties of seeds on the design parameters of the equipment [6; 7]. At the same time, the studies by S. Lee, N. Sharaby, and J. Fan emphasize the critical importance of considering external factors, in particular the material of the contact surface and the moisture content of seeds, which significantly affect their friction properties [8–10].

In the study by J. Wang the DEM is successfully applied to investigate the operating parameters of sowing machines, demonstrating high predictive power in optimizing fertilizer application processes [11]. Of particular value is the relationship identified by the authors between the microscopic characteristics of particles (force, kinetic energy, free space) and the macroscopic performance indicators of the device (coefficient of variation). This confirms the promise of using DEM to analyze processes similar to pea sowing simulation, when accounting for seed moisture content and fractional composition requires detailed study of particle mechanics.

There is presented a comprehensive experimental approach developed to determine the physical and mechanical parameters of granular mineral fertilizers for calibrating DEM models based on the angles of natural slope and collapse of seeds when poured from a rectangular container [12]. The analysis of the study shows that,

despite the achieved accuracy of calibration of the contact model parameters based on the angles of natural slope and collapse, the methods used are simplified and have a fundamental limitation. They simulate the process of particle spillage under the action of gravity in static conditions, which does not allow for adequate consideration of the real dynamic processes occurring in reel sowing machines. In these conditions, seeds are subjected to complex forces, including forced movement by working parts, friction against various surfaces, impact interactions, and compression effects, which differ significantly from free spillage. In order to accurately simulate the movement of seeds in a sowing machine, it is necessary to develop a more sophisticated calibration method that will directly take into account the specific force and kinematic conditions of the sowing process.

A team of scientists from the USA using a comprehensive approach for calibrating dry bulk materials by the discrete element method, employing shock wave propagation, cone penetration, direct shear, triaxial loading, and flow in a bunker, came to the conclusion that calibrating parameters for DEM is a non-trivial task, and its accuracy critically depends on the correct determination of contact stiffnesses and damping [13]. This confirms our hypothesis about the need to develop an improved calibration method that goes beyond static tests and the promise of using a comprehensive approach to simulate real dynamic processes in agricultural machinery.

Thus, despite the progress achieved, the dominant calibration methods based on determining the natural slope angle and arch angle have significant limitations. In particular, they do not fully take into account the change in the dynamic friction coefficient of pea seeds depending on moisture content and its effect on the force loads in the device, and also ignore the polydisperse distribution of seeds by fractions, which also critically affects the nature of their interaction in the working area of the sowing machine. The current task is to develop an improved calibration method that integrates these factors to improve the accuracy of digital twins.

MATERIALS AND METHODS

On the basis of analyzing literary sources and previously conducted own research, there was identified limitations of calibration methods (angles of natural slope and collapse) when modeling seed movement.

There was determined the effect fractional composition of pea seeds on friction coefficients. There was used a sieve analysis to evaluate the polydisperse distribution of pea seeds by fractions. Due to the close spherical shape of the seeds, there were used sieves with round holes. The range of cell sizes was determined by measuring the minimum and maximum seed sizes with a micrometer. After sifting, the seeds were divided into fractions and their mass was measured on an electronic scale.

There was developed a method for calibrating the contact model taking into account force effects in conditions close to the operation of the seeding apparatus. To calibrate the parameters of the DEM model in terms of torque, there was developed a laboratory installation based on the John Deere 1910 seeding machine. The torque was measured using a digital dynamometer. The experiments used pea seeds with variable moisture content in the range from 9 to 23%.

Verification of models by comparing DEM modeling with data from field experiments in a coil apparatus. This was done by comparing the results of experiments to determine the torque in a laboratory installation with different moisture content levels of pea seeds and in the Rocky Dem software package with a different coefficient of dynamic friction between particles k_d when changing the coefficient of dynamic friction of particles with the walls of the apparatus.

There was used the sieve analysis was used to evaluate the polydisperse distribution of pea seeds by fraction. Since pea seeds are nearly spherical in shape, a set of sieves with round holes was used for classification (Fig. 1 a). The range of cell sizes was determined based on preliminary measurements with a micrometer of the minimum (< 4.5 mm) and maximum (> 7 mm) linear dimensions of the seeds.

Seeds sifted through sieves with hole sizes of 4.5, 5.0, 5.5, 6.0, and 7.0 mm were divided into fractions and their weight (Fig. 1 b) was measured on HL-100 electronic scales. Peas with a density of $1,200 \text{ kg/m}^3$ and a bulk density of 720 kg/m^3 were used for the study, with a sample weight of 0.5 kg.

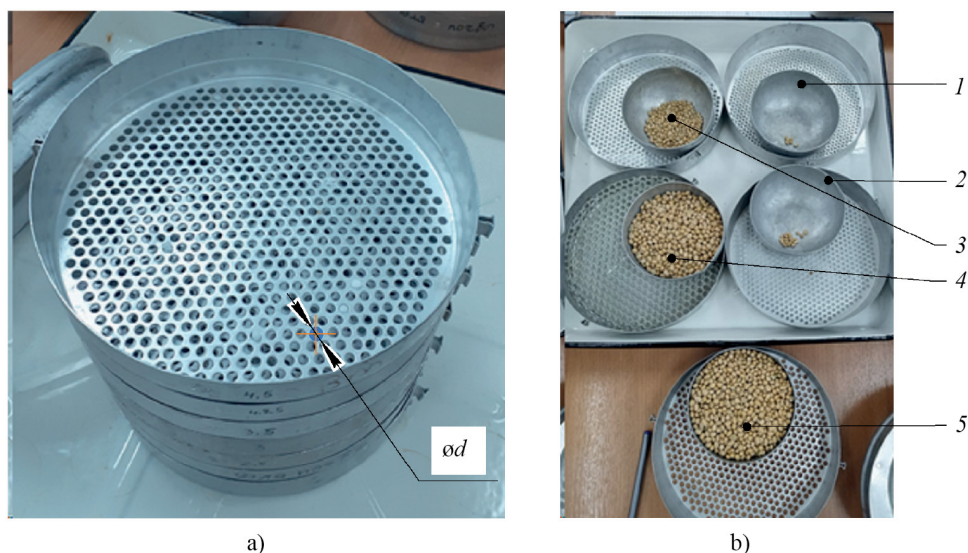


Fig. 1. Study of the fractional composition of pea seeds:

- a) sieve classifier; b) pea seed fractions: 1 – seed size with a diameter of less than 4.5 mm;
- 2 – fraction seed size with a diameter of 4.5 to 5.0 mm; 3 – fraction seed size with a diameter of 5.0 to 6.0 mm; 4 – fraction seed size with a diameter of 6.0 to 7.0 mm;
- 5 – fraction seed size with a diameter of more than 7.0 mm

Note: d – diameter of the sieve classifier mesh, fraction, mm.

Source: The photographs for figure 1 a was taken by A. M. Mukhametdinov during experimental research in the laboratory of biochemical analysis and biotechnology at Bashkir State Agrarian University in 2024.

One of the main physical and mechanical parameters of pea seeds is their friction properties. The main type of friction that occurs between seeds and the surfaces of the working parts of sowing machines is sliding friction. The dynamic friction coefficient characterizes the resistance to the movement of seeds relative to the surfaces of the sowing

machine parts, as well as between the seeds themselves. The seeds are captured by the reel and held by adhesion and friction forces. Under the action of rotation, the working part of the reel transports the seeds. A change in the dynamic friction coefficient affects the force required to move the pea seeds. This creates resistance to the rotating coil, which requires effort to overcome the friction forces and requires a certain torque to turn the coil. We used the change in torque in the coil drive depending on the physical and mechanical properties of the seeds as a comprehensive criterion for calibrating the parameters of the DEM model.

To calibrate the DEM model parameters based on torque, we developed a laboratory setup based on the John Deere 1910 seeding complex (Fig. 2 a). Torque was measured using a digital dynamometer (Fig. 2 b). The experiments used pea seeds with varying moisture content ranging from 9 to 23%. It should be noted that the optimal moisture content for sowing peas according to GOST R 52325-2005¹ is 11–19%, which meets the agronomic requirements for active swelling and germination without the risk of fungal diseases. This factor, along with the increase in moisture content during etching, determined the upper limit of the range under study.

The design of the installation (Fig. 2 a) includes a hopper 1 for pea seeds, a reel sowing machine 3 with a housing 4, and a digital dynamometer 5 with a key 6 for measuring torque. The field experiment method consisted of filling the hopper with 1 kg of seeds and then rotating the reel 3 using the key 6. The rotating reel captures and transports the seeds inside the housing 4, and the resulting torque is recorded by the dynamometer 5.

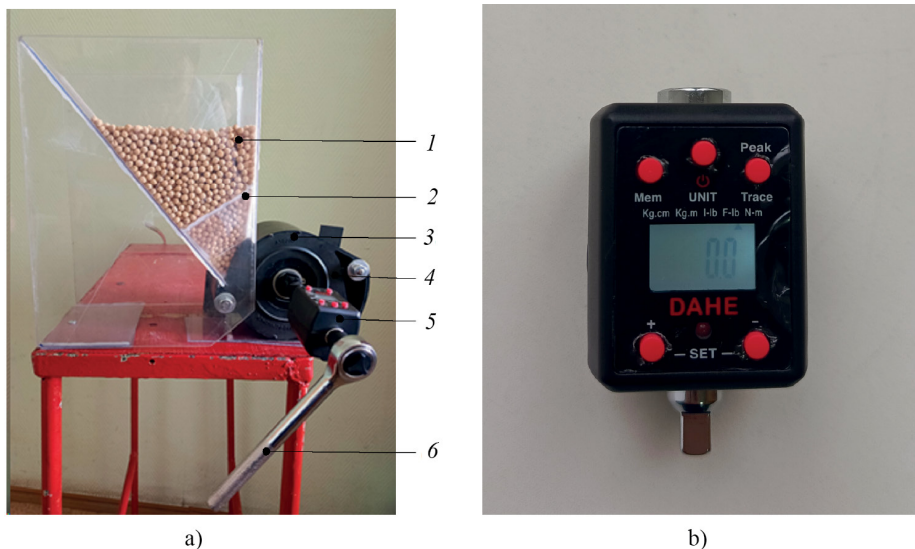


Fig. 2. Conducting field experiments:
a) laboratory setup of the sowing machine; b) digital electronic dynamometer

Source: The photographs for figure 2 a was taken by A. M. Mukhametdinov during experimental research at the Department of Mechatronic Systems and Agricultural Machinery of Bashkir State Agrarian University in 2025.

¹ GOST R 52325-2005. [Seeds of Agricultural Plants. Varietal and Sowing Qualities. Technical Conditions]. Available at: <https://fsvps.gov.ru/files/gost-r-52325-2005-nacionalnyj-standart-rossi/> (accessed 14.08.2025).

To conduct model experiments in the KOMPAS-3D environment, there was developed a three-dimensional model of a full-scale laboratory setup (Fig. 3 a), which was then imported into the Rocky DEM software package (Fig. 3 b). The created digital twin allows visualizing the movement of pea seeds in the working area of the sowing machine.

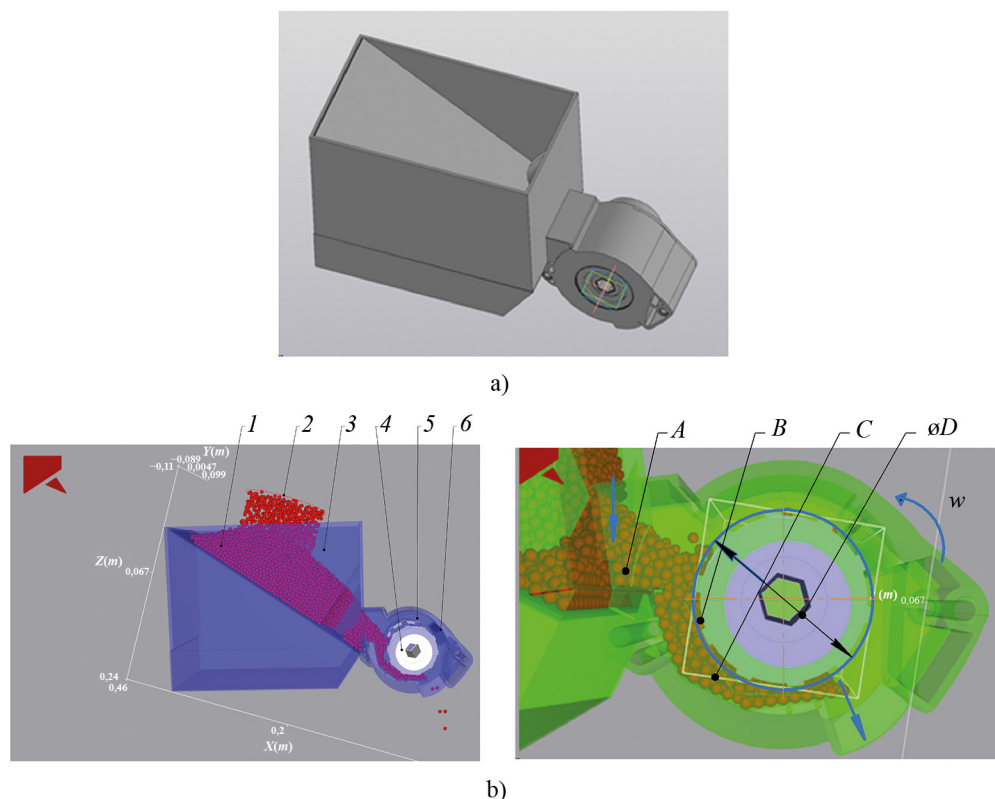


Fig. 3. Model of the laboratory setup: a) 3D model in KOMPAS; b) model in Rocky DEM: 1 – pea seed particles; 2 – particle generator Inlet; 3 – hopper; 4 – coil; 5 – housing; 6 – cleaner

Note: $Y(m)$ – the coordinate axis; $Z(m)$ – the coordinate axis; $X(m)$ – the coordinate axis; A – particles in the hopper moving under the action under the influence of gravity; B – particles captured by the coil grooves and transported by its rotation; C – particles in the gap between the coil and the body, whose movement is caused by the shear of the active layer; D – diameter; w – angular velocity.

Source: Figures 3–6 compiled by the authors of the article.

The simulation of the process begins with the generation of seed particles through Inlet 2 and filling of the hopper cavity 3. The specified rotation of coil 4 ensures the capture and transport of particles inside housing 5, while cleaner 6 prevents their reverse movement.

To rotate a coil with a diameter D at an angular velocity w , it is necessary to overcome the torque, the value of which is determined by the physical and mechanical properties of the seed particles and the material of the sowing machine (Fig. 3 b). During operation, three characteristic zones of particle movement can be distinguished:

- Zone *A*: particles in the hopper moving under the action under the influence of gravity;
- Zone *B*: particles captured by the coil grooves and transported by its rotation;
- Zone *C*: particles in the gap between the coil and the body, whose movement is caused by the shear of the active layer.

The intensity of the active layer movement in zone *C* is determined by the dynamic friction coefficient between both the seed particles and between the particles and the inner surface of the sowing machine shell.

Based on an analysis of research in the field of seed modeling using the discrete element method, it has been established that the *Linear spring dashpot* model is used as the contact model. This model takes into account both elastic and dissipative (friction) parameters of particles. The normal contact force F_n in this model consists of a linear elastic repulsive force and a restoring force between pea seed particles, determined by the formula [13–15]:

$$F_n = k_{nl}s_n + C_n s_{n1},$$

where F_n – normal contact force, N; k_{nl} – normal contact stiffness of a linear hysteresis spring, N/m; s_n – contact with normal overlap, m; C_n – is the recovery coefficient; s_{n1} – is the time derivative of the contact normal overlap, m/s.

The degree of seed elasticity is determined by the recovery coefficient C_n upon impact, which is the ratio of the normal component of the pea seed velocity before impact to its value after collision with the working surface of the sowing machine working parts.

The main parameters of the *Linear spring dashpot* contact model, based on our own research and scientific works [1; 15], are presented in Table 1.

Table 1

Parameters of the contact model

Parameter	Indicators
Young modulus E , Pa [14; 15]	$1.9\text{--}2 \cdot 10^8$
Poisson ratio ν [14; 15]	0.22
Coefficient of static friction between seeds f_{st}	0.4–0.6
Dynamic friction coefficient between seeds f_d	0.14–0.16
Recovery coefficient k_{vost}	0.24–0.34
Coefficient of static friction between seeds and the walls of the apparatus $f_{st,k}$	0.3
Coefficient of dynamic friction between seeds and the walls of the apparatus $k_{d,k}$	0.08 (based on experimental studies)
Particle diameter d , mm	based on studies of the polydisperse distribution of pea seeds

Source: the tables 1–3 were compiled by the authors of the article.

The calibration of the parameters of the contact DEM model of pea seeds was performed according to the algorithm presented in the block diagram (Fig. 4).

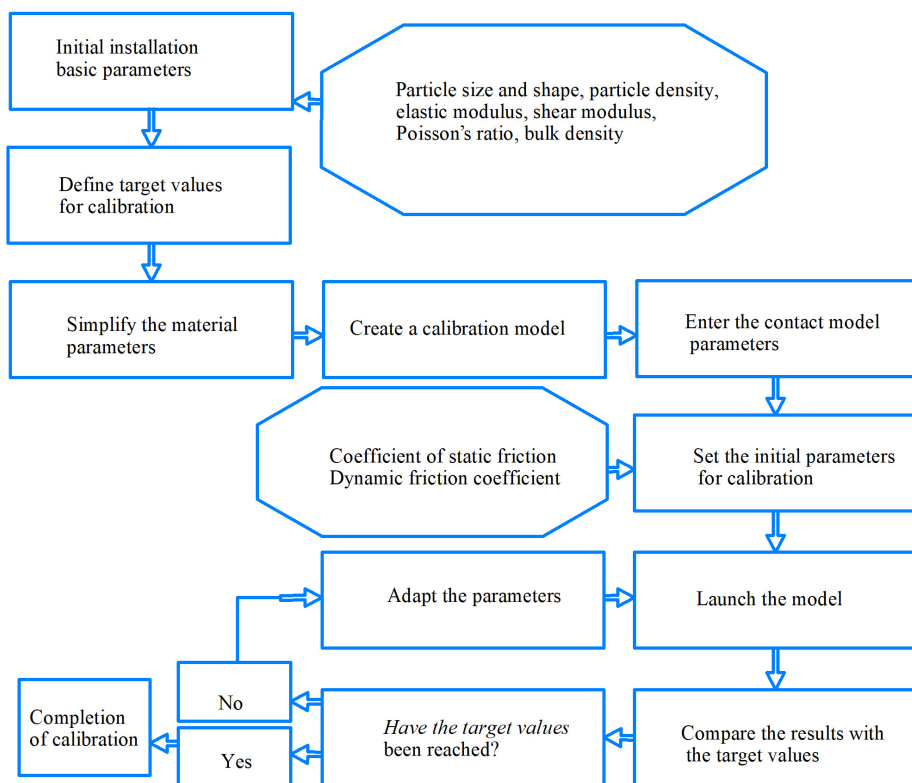


Fig. 4. Parameter calibration using the discrete element method

The model of the sowing machine operation was implemented using Rocky Dem software on a computer with an Intel Core i9-14900HX processor with a frequency of 2.39 GHz and a GeForce RTX4060 (8 GB) video card.

RESULTS

Table 2 shows the polydisperse distribution of pea seeds by size based on the results of sieving.

Table 2

Results of determining the polydisperse distribution of pea seeds by size

Seed name	No	Fraction (size) seeds with a diameter of mm	Cell	Seed weight, g	Fraction yield, %
Peas	1	less than 4.5	—	1.4	0.3
	2	4.5–5.0	4.5	2.0	0.4
	3	5.0–6.0	5.0	11.6	2.3
	4	6.0–7.0	6.0	416.8	83.4
	5	7.0–10	7.0	68.2	13.6

The sieving results show pronounced polydispersity of the seed material. It was found that the bulk of the seeds (83.4%) are concentrated in the diameter range of 6–7 mm. A significant proportion (13.6%) falls into the large fraction with a diameter of more than 7 mm, while small fractions (less than 5 mm) account for less than 3%. The obtained distribution was used to parameterize the DEM model in the Rocky DEM software package by specifying the corresponding percentage ratio of particles of different diameters.

Table 3 shows the results of experiments to determine the torque on a laboratory setup at different moisture contents of pea seeds and in the Rocky Dem software package at different coefficients of dynamic friction between particles k_d when changing the coefficient of dynamic friction of particles with the walls of the apparatus.

Table 3

Results of experiments on a laboratory setup and modeling in Rocky Dem

	Full-scale experiments							
Seed moisture content $W\%$	9.0	11.2	13.8	15.1	17.0	19.3	21.4	23.0
Average torque value $M, \text{N}\cdot\text{m}$	0.3	0.3	0.5	0.6	0.7	0.8	1.0	1
Dispersion	0.007	0.013	0.022	0.017	0.013	0.003	0.027	0.028
Mean square deviation	0.08	0.11	0.15	0.13	0.11	0.05	0.16	0.17
	Modeling in Rocky Dem							
Dynamic friction coefficient between particles k_d	0.135	0.14	0.145	0.15	0.155	0.16	0.165	0.17
Average torque value $M, \text{N}\cdot\text{m}$ at a coefficient of dynamic friction between particles and walls $k_{d,k}$ at								
$k_{d,k} = 0.07$	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.8
$k_{d,k} = 0.08$	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	1.0	1
$k_{d,k} = 0.09$	0.4	0.5	0.6	0.7	0.7	1.0	1.1	1.1

Based on the data in Table 3, there were constructed the graphs showing the dependence of torque on the moisture content of pea seeds (Fig. 5 a) and on the dynamic friction coefficient of the simulated particles (Fig. 5 b).

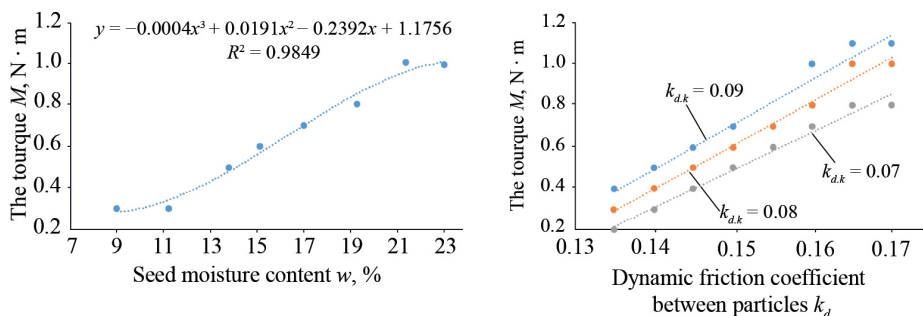


Fig. 5. Torque dependence: a) on the moisture content of pea seeds in a field experiment; b) on the coefficient of dynamic friction in Rocky Dem

For modeling, the coefficient of dynamic friction of pea seeds with the walls of the apparatus $k_{d,k}$ was used in the range from 0.07 to 0.09. The most accurate values

of torque and the nature of the change (slope of the trend line) lie within the range of the particle-particle dynamic friction coefficient $k_d = 0.14...0.16$, which corresponds to a moisture content of 11.2 to 19.3%. At the same time, the torque varies in the range from 0.3 to 1.0 N·m.

As a result of parametric research, it was established that the most adequate correspondence to full-scale experiments is achieved with the following friction coefficient values in the *Linear spring dashpot* model:

- coefficient of dynamic friction between particles $k_d = 0.14...0.16$;
- coefficient of dynamic friction between particles and the walls of the apparatus $k_{d,k} = 0.07...0.09$.

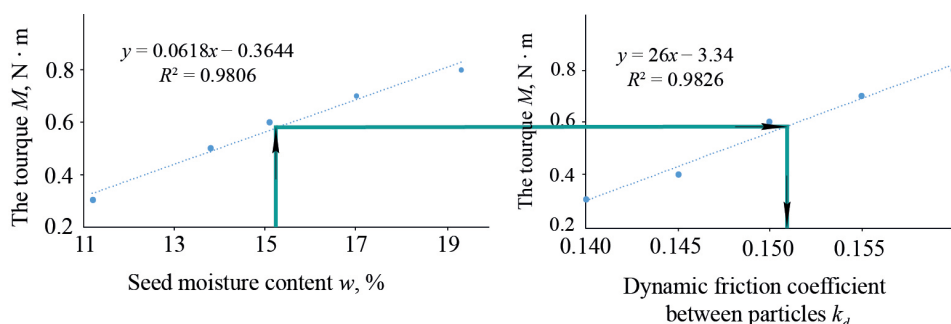


Fig. 6. Nomogram for selecting the dynamic friction coefficient depending on the moisture content of pea seeds

The nomogram obtained will be used in further research for the digital twin of the pea seed sowing process and the operation of the sowing machine when selecting the parameters of the contact model in the Rocky Dem software.

DISCUSSION

Field experiments demonstrated a clear correlation between seed moisture content and torque on the sowing machine shaft. As moisture content increased from 9 to 23%, the average torque value increased from 0.3 to 1.0 N·m, indicating a significant effect of moisture content on the friction characteristics of seeds. The dispersion of measurements was in the range of 0.003–0.028, confirming the reproducibility of the results.

This range of parameters corresponds to seed moisture content of 11.2–19.3% and provides a calculated torque of 0.3–1.0 N·m, which statistically significantly coincides with the experimental data.

A comparison of the results of physical and numerical experiments showed satisfactory agreement: the experimental torque values (0.3–1.0 N·m) are completely within the range obtained in the simulation (0.2–1.1 N·m).

The studies conducted made it possible to establish the main patterns determining the interaction of pea seeds with the working parts of the sowing machine. Analysis of the particle size distribution (Table 2) showed a pronounced polydispersity of the seed material: the predominant fraction (83.4%) has a diameter of 6–7 mm, while large seeds (> 7.0 mm) account for 13.6% and small seeds (< 5 mm) account for less than 3%.

The data obtained are consistent with the results of studies by B. M. Ghodki [4], V. I. Khizhnyak [16], and A. N. Marthekha [17], confirming the representativeness of the sample. The established fractional structure was taken into account when parameterizing the DEM model in the Rocky DEM software package, where the corresponding percentage ratio of particles is specified. The observed relationship between seed size and friction—larger and heavier seeds exhibit a lower coefficient of dynamic friction due to easier sliding—was also reflected in the model.

The significant influence of seed moisture on their friction properties has been experimentally confirmed. With an increase in moisture from 9 to 23%, the coefficient of dynamic friction increases, which leads to an increase in the torque from 0.3 to 1.0 N·m required for the seeding machine to operate. A comparative analysis of the dependencies (Fig. 5 a, b) showed that with a coefficient of friction between the seeds and the walls of the device $k_{d,k} = 0.8$, the Rocky DEM model most accurately reproduces the nature of the torque change observed in the full-scale experiment. These results correlate with data from previous studies on the calibration of pea seed parameters [15].

Three characteristic modes of operation of the apparatus were identified depending on seed moisture content:

- range 9–11%: the torque is minimal and stable, which is explained by the easy movement of dry seeds with low friction.
- range 11.2–19.3%: a progressive increase in torque is observed, due to increased adhesion and friction.
- range above 19.3%: torque stabilizes, probably due to a decrease in adhesion between overmoistened seeds.

Calibration of the contact model parameters of the digital twin showed that of all the parameters studied (Poisson's ratio 0.22; Young's modulus $1.9\text{--}2 \times 10^8$ Pa; recovery coefficient 0.24–0.34), the coefficient of dynamic friction between seeds has the greatest influence on the nature of the torque change. It has been established that the values of $k_d = 0.14\text{--}0.16$ in the model correspond to the experimental data at a moisture content of 11.2–19.3% and provide a calculated torque of 0.3–1.0 N·m, which confirms the adequacy of the calibrated DEM model.

CONCLUSION

Based on the established dependencies, a nomogram was constructed for the rapid determination of the dynamic friction coefficient depending on seed moisture content, which will be used in further studies of the digital twin of the sowing process.

The results obtained confirm the adequacy of the developed DEM model and demonstrate the promise of using the method of calibrating the parameters of the contact model by torque to predict the performance characteristics of sowing machines.

The study allowed us to develop and verify a method for calibrating the parameters of the contact model for the digital twin of pea seeds, which adequately describes their behavior in the working area of the coil seeder. The following main conclusions were obtained as a result of the work.

The fractional composition of pea seeds was established, showing a pronounced polydispersity of the material. The dominant fraction (83.4%) has a diameter of 6–7 mm,

which was taken into account when parameterizing the DEM model in the Rocky DEM software package to create a representative digital twin.

There was experimentally proven a significant influence of seed moisture content on their friction properties. With an increase in moisture content from 9% to 23%, the dynamic friction coefficient increases, which leads to a natural increase in the torque on the shaft of the sowing machine from 0.3 to 1.0 N·m.

A comprehensive calibration method has been developed and tested, using torque as a criterion for conformity. The range of key parameters of the Linear spring dashpot contact model has been established, ensuring high simulation accuracy:

- seed-seed dynamic friction coefficient k_d : 0.14–0.16;
- dynamic friction coefficient *seed-apparatus wall* $k_{d,k}$: 0.07–0.09.

A nomogram was constructed for the rapid determination of the dynamic friction coefficient depending on seed moisture content, which allows for the effective configuration of a digital twin for modeling the sowing process under various conditions.

Verification of the model confirmed its adequacy: the discrepancies between the results of field experiments and DEM modeling data do not exceed 10%, and the nature of the torque change is reproduced correctly.

The use of the proposed calibration method based on torque allows the creation of high-precision digital twins suitable for optimizing the design and technological parameters of sowing machines, which contributes to improving the quality of sowing and saving resources in agricultural production.

REFERENCES

1. Coetzee C.J. Calibration of the Discrete Element Method and the Effect of Particle Shape. *Powder Technology*. 2016;(297):50–70. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.04.003>
2. Horabik J., Molenda M. Parameters and Contact Models for DEM Simulations of Agricultural Granular Materials: A Review. *Biosystems Engineering*. 2016;147(2):206–225. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.02.017>
3. Ghodki B.M., Kumar K.C., Goswami T.K. Modeling Breakage and Motion of Black Pepper Seeds in Cryogenic Mill. *Advanced Powder Technology*. 2018;29(5):1055–1071. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2018.01.023>
4. Ghodki B.M., Patel M., Namdeo R., Carpenter G. Calibration of Discrete Element Model Parameters: Soybeans. *Computational Particle Mechanics*. 2019;6(1):3–10. <https://doi.org/10.1007/s40571-018-0194-7>
5. Bangura K., Gong H., Deng R., Tao M., Liu C., Cai Y., et al. Simulation Analysis of Fertilizer Discharge Process Using the Discrete Element Method (DEM). *PLoS ONE*. 2020;15(7):e0235872. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0235872>
6. Gao X., Zhou Z.Y., Xu Y., Yu Y.B., Su Y., Cui T. Numerical Simulation of Particle Motion Characteristics in Quantitative Seed Feeding System. *Powder Technology*. 2020;(367):643–658. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.04.021>
7. Gao X., Cui T., Zhou Z., Yu Y., Xu Y., Zhang D., et al. DEM Study of Particle Motion in Novel High-Speed Seed Metering Device. *Advanced Powder Technology*. 2021;32(5):1438–1449. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2021.03.002>
8. Lee S., Park J. Standardized Friction Experiment for Parameter Determination of Discrete Element Method and its Validation Using Angle of Repose and Hopper Discharge. *Multiscale Science and Engineering*. 2019;(1):247–255. <https://doi.org/10.1007/s42493-019-00020-6>

9. Sharaby N., Doroshenko A., Butovchenko A. Modelling and Verification of Sesame Seed Particles Using the Discrete Element Method. *Journal of Agricultural Engineering*. 2022;53(2). <https://doi.org/10.4081/jae.2022.1286>
10. Fan J., Wang H., Sun K., Zhang L., Wang L., Zhao J., et al. Experimental Verification and Simulation Analysis of a Multi-Sphere Modelling Approach for Wheat Seed Particles Based on the Discrete Element Method. *Biosystems Engineering*. 2024;(245):135–151. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2024.07.009>
11. Wang J., Wang R., Ju J., Song Y., Fu Z., Lin T., et al. Study on the Influence of Grooved-Wheel Working Parameters on Fertilizer Emission Performance and Parameter Optimization. *Agronomy*. 2023;13(11):2779. <https://doi.org/10.3390/agronomy13112779>
12. Mudarisov S.G., Mukhametdinov A.M., Farkhutdinov I.M. Determination of Physical and Mechanical Parameters of Granular Mineral Fertilizers for use in Digital Twins. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2024;(204):478–499. Available at: <http://ej.kubagro.ru/2024/10/pdf> (accessed 19.08.2025).
13. Pazouki A., Kwarto M., Williams K., Likos W., Serban R., Jayakumar P., et al. Compliant Contact Versus Rigid Contact: A Comparison in the Context of Granular Dynamics. *Physical Review E*. 2017;(96):042905. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.96.042905>
14. Mudarisov S.G., Mukhametdinov A.M., Farkhutdinov I.M. Overview of Contact Parameters and Models for Modeling Seeds and Granular Fertilizers Using Discrete Element Methods. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2024;(197):58–85. Available at: <http://ej.kubagro.ru/2024/03/pdf> (accessed 19.08.2025).
15. Mudarisov S., Farkhutdinov I., Imangulov V., Podolyakin V., Nasyrov R. Assessment of Significance and Selection of Contact Model Parameters When Simulating Peas Seeds Using the Discrete Element Method. *Vestnik of Kazan State Agrarian University*. 2024;19(1):54–60. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2024-54-60>
16. Khizhnyak V.I., Sheikin A.S., Khizhnyak D.V., Yatsenko P.L., Khronyuk V.B. Study of the Dimensional Characteristics of Pea Seeds for the Development and Operation of Agricultural Machinery. *Don Agrarian Science Bulletin*. 2024;17(4):59–68. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: http://vd.achgaa.ru/n68_24.html (accessed 19.08.2025).
17. Marteha A.N., Toroptsov V.V. The Influence of Different Drying Methods on the Physical and Mechanical Properties and Germination of Pea Seeds. *Agroengineering*. 2024;26(1):65–72. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-1-65-72>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Coetzee C.J. Calibration of the Discrete Element Method and the Effect of Particle Shape. *Powder Technology*. 2016;297:50–70. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.04.003>
2. Horabik J., Molenda M. Parameters and Contact Models for DEM Simulations of Agricultural Granular Materials: A Review. *Biosystems Engineering*. 2016;147(2):206–225. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.02.017>
3. Ghodki B.M., Kumar K.C., Goswami T.K. Modeling Breakage and Motion of Black Pepper Seeds in Cryogenic Mill. *Advanced Powder Technology*. 2018;29(5):1055–1071. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2018.01.023>
4. Ghodki B.M., Patel M., Namdeo R., Carpenter G. Calibration of Discrete Element Model Parameters: Soybeans. *Computational Particle Mechanics*. 2019;6(1):3–10. <https://doi.org/10.1007/s40571-018-0194-7>
5. Bangura K., Gong H., Deng R., Tao M., Liu C., Cai Y., et al. Simulation Analysis of Fertilizer Discharge Process Using the Discrete Element Method (DEM). *PLoS ONE*. 2020;15(7):e0235872. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0235872>
6. Gao X., Zhou Z.Y., Xu Y., Yu Y.B., Su Y., Cui T. Numerical Simulation of Particle Motion Characteristics in Quantitative Seed Feeding System. *Powder Technology*. 2020;(367):643–658. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.04.021>

7. Gao X., Cui T., Zhou Z., Yu Y., Xu Y., Zhang D., et al. DEM Study of Particle Motion in Novel High-Speed Seed Metering Device. *Advanced Powder Technology*. 2021;32(5):1438–1449. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2021.03.002>
8. Lee S., Park J. Standardized Friction Experiment for Parameter Determination of Discrete Element Method and its Validation Using Angle of Repose and Hopper Discharge. *Multiscale Science and Engineering*. 2019;(1):247–255. <https://doi.org/10.1007/s42493-019-00020-6>
9. Sharaby N., Doroshenko A., Butovchenko A. Modelling and Verification of Sesame Seed Particles Using the Discrete Element Method. *Journal of Agricultural Engineering*. 2022;53(2). <https://doi.org/10.4081/jae.2022.1286>
10. Fan J., Wang H., Sun K., Zhang L., Wang L., Zhao J., et al. Experimental Verification and Simulation Analysis of a Multi-Sphere Modelling Approach for Wheat Seed Particles Based on the Discrete Element Method. *Biosystems Engineering*. 2024;(245):135–151. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2024.07.009>
11. Wang J., Wang R., Ju J., Song Y., Fu Z., Lin T., et al. Study on the Influence of Grooved-Wheel Working Parameters on Fertilizer Emission Performance and Parameter Optimization. *Agronomy*. 2023;13(11):2779. <https://doi.org/10.3390/agronomy13112779>
12. Mudarisov S.G., Mukhametdinov A.M., Farkhutdinov I.M. Determination of Physical and Mechanical Parameters of Granular Mineral Fertilizers for use in Digital Twins. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2024;(204):478–499. Available at: <http://ej.kubagro.ru/2024/10/pdf> (accessed 19.08.2025).
13. Pazouki A., Kwarto M., Williams K., Likos W., Serban R., Jayakumar P., et al. Compliant Contact Versus Rigid Contact: A Comparison in the Context of Granular Dynamics. *Physical Review E*. 2017;(96):042905. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.96.042905>
14. Мударисов С.Г., Мухаметдинов А.М., Фархутдинов И.М. Обзор параметров и моделей контактов для моделирования семян и гранулированных удобрений методами дискретных элементов. *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2024;(197):58–85. URL: <http://ej.kubagro.ru/2024/03/pdf> (дата обращения: 19.08.2025).
15. Мударисов С.Г., Фархутдинов И.М., Имангулов В.Х., Подолякин В.А., Насыров Р.Р. Оценка значимости и выбор параметров контактной модели при моделировании семян гороха методом дискретных элементов. *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2024;19(1):54–60. <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2024-54-60>
16. Хижняк В.И., Шейкин А.С., Хижняк Д.В., Яценко П.Л., Хронюк В.Б. Исследование размерных характеристик семян гороха для разработки и эксплуатации сельскохозяйственных машин. *Вестник аграрной науки дона*. 2024;17(4):59–68. URL: http://vd.achgaa.ru/n68_24.html (дата обращения: 19.08.2025).
17. Мартеха А.Н., Топорцев В.В. Влияние различных способов сушки на физико-механические свойства и всхожесть семян гороха. *Агроинженерия*. 2024;26(1):65–72. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-1-65-72>

About the authors:

Airat M. Mukhametdinov, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Laboratory Digital Twins and Design of Machines for Chemical and Biological Plant Protection, Bashkir State Agrarian University (34 50-Letiya Oktybrya St., 450001 Ufa, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3802-8151>, Researcher ID: G-3461-2018, Scopus ID: 57204634851, SPIN-code: 8297-3621, airat102@mail.ru

Salavat G. Mudarisov, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Academician of the Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan, Leading Researcher at the Laboratory Digital Twins and Design of Machines for Chemical and Biological Plant Protection, Bashkir State Agrarian University (34 50-Letiya Oktybrya St., 450001 Ufa, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9344-2606>, Researcher ID: G-2217-2018, Scopus ID: 57200284613, SPIN-code: 6893-9957, salavam@gmail.com

Ilnur R. Miftakhov, Cand.Sci. (Eng.), Junior Researcher at the Laboratory of Digital Twins and Design of Machines for Chemical and Biological Plant Protection, Bashkir State Agrarian University (34 50-Letiya Oktybrya St., 450001 Ufa, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3125-3532>, Scopus ID: 57204635364, SPIN-code: 9429-5990, info323@bk.ru

Authors contribution:

A. M. Mukhametdinov – preparation, creation and preparation of the published work, specifically visualization.
S. G. Mudarisov – ideas; formulation or evolution of overarching the goals and aims.
I. R. Miftakhov – presentation, creation and preparation of the published work, specifically writing the initial draft (including substantive translation).

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 17.11.2025; revised 04.03.2026; accepted 05.03.2026

Об авторах:

Мухаметдинов Айрат Мидхатович, кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией (научно-исследовательской) цифровых двойников и конструирования машин для химической и биологической защиты Башкирского государственного аграрного университета, (450001, Российская Федерация, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, д. 34), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3802-8151>, Researcher ID: G-3461-2018, Scopus ID: 57204634851, SPIN-код: 8297-3621, airat102@mail.ru

Мударисов Салават Гумерович, доктор технических наук, профессор, академик Академии наук Республики Башкортостан, ведущий научный сотрудник лаборатории цифровых двойников и конструирования машин для химической и биологической защиты растений Башкирского государственного аграрного университета, (450001, Российская Федерация, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, д. 34), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9344-2606>, Researcher ID: G-2217-2018, Scopus ID: 57200284613, SPIN-код: 6893-9957, salavam@gmail.com

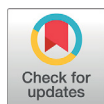
Мифтахов Ильнур Ринатович, кандидат технических наук, младший научный сотрудник лаборатории цифровых двойников и конструирования машин для химической и биологической защиты растений Башкирского государственного аграрного университета, (450001, Российская Федерация, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, д. 34), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3125-3532>, Scopus ID: 57204635364, SPIN-код: 9429-5990, info323@bk.ru

Вклад авторов:

A. M. Мухаметдинов – создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования и полученных данных.
С. Г. Мударисов – формулирование идеи исследования, целей и задач.
И. Р. Мифтахов – создание и подготовка рукописи: написание черновика рукописи, включая его перевод на иностранный язык.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 17.11.2025; поступила после рецензирования 04.03.2026;
принята к публикации 05.03.2026*

**ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ /
TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT**<https://doi.org/10.15507/2658-4123.26363.500-517>EDN: <https://elibrary.ru/leotep>

УДК / UDK 63:004.896:621.395.642

*Оригинальная статья / Original article***Development of Relay-Based Control System
for a Robot Swarm Used for Agricultural Operations****A. Yu. Taranov***Federal Research Centre The Southern Scientific Centre
of the Russian Academy of Sciences,
Rostov-on-Don, Russian Federation*✉ mailfortexas@mail.ru*Abstract*

Introduction. Agriculture requires efficient processing of large land areas (fields, orchards, pastures). The use of distributed swarm robotics systems allows automating these processes, reducing labor costs and increasing the precision of operations. The efficiency of these systems largely depends on the control methods ensuring coordination of robots, optimal task distribution, and reliable communication between them that is critical for parallel processing and minimizing downtime.

Aim of the Study. The study is aimed at improving the robot swarm control efficiency by developing an advanced method with the use of relay communication and a distributed ledger.

Materials and Methods. The object of the study was a swarm robotics system for processing agricultural areal objects. The study was conducted using a software model implemented in Python, which simulated the operation of a robot swarm with relay-based communication. At the first stage, there was implemented an improved control method involving a distributed ledger of processed targets and a mechanism for dynamic role redistribution among robots. At the second stage, the system operation was simulated using a set of synthetic test tasks with varying sizes of the objects processed and different robot numbers in the swarm. At the final stage, the improved method was compared with baseline control method terms of task execution time, followed by a statistical evaluation of the obtained results.

Results. There has been developed an improved robot swarm control method with a relay-based communication involving a distributed ledger of processed objects and a mechanism for dynamic redistribution of roles among robots. The simulation results demonstrated a 5.75% reduction in the average time of execution of full set of test tasks compared to the base approach. For performing the subset of tasks when the proposed method can realize fully its advantages, the reduction in processing time reaches 10.34%.

© Taranov A.Yu., 2026

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

Conclusion. The improved robot swarm control method enables more effective task distribution and an increased degree of parallelism in processing. This has high practical significance for application in agricultural robotic systems, especially when using budget-friendly equipment. The development prospects include adaptive control, integration with other optimization methods, and the expansion of the approach to heterogeneous swarms.

Keywords: agricultural robots, UAVs, swarm control, data transmission, relay communication, distributed ledger

Conflict of interest: The author declare no conflict of interest.

For citation: Taranov A.Yu. Development of a Relay-Based Control System for a Robot Swarm Used for Agricultural Operations. *Engineering Technologies and Systems*. 2026;36(3):500–517. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.26363.500-517>

Разработка системы релейного управления роем роботов для сельскохозяйственных работ

А. Ю. Таранов

Федеральный исследовательский центр

Южный научный центр Российской академии наук,

г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

✉ mailfortexas@mail.ru

Аннотация

Введение. Сельское хозяйство требует эффективной обработки больших площадных объектов (поля, сады, пастбища). Использование распределенных роевых роботизированных систем позволяет автоматизировать эти процессы, снижая трудозатраты и повышая точность операций. Эффективность таких систем в значительной степени зависит от методов управления, обеспечивающих координацию роботов, оптимальное распределение задач и устойчивую связь между ними, что критично для обеспечения параллельной обработки и минимизации простоев.

Цель исследования. Повышение эффективности управления роем бюджетных роботов путем разработки усовершенствованного метода использования релейной связи и распределенного реестра.

Материалы и методы. Объектом исследования являлась роевая робототехническая система, предназначенная для обработки площадных объектов сельхозназначения. Исследование проводилось с использованием программной модели, реализованной на Python, в которой моделировалась работа роя роботов с релейной связью. На первом этапе был реализован усовершенствованный метод управления, включающий распределенный реестр обработанных целей и механизм динамического перераспределения ролей между роботами. На втором этапе выполнялось моделирование работы системы на наборе синтетических тестовых задач с различными размерами обрабатываемых объектов и численностью роя. На заключительном этапе проводилось сравнение с базовым методом управления по времени выполнения задач и статистическая оценка полученных результатов.

Результаты исследования. Разработан усовершенствованный метод управления роем роботов с релейной связью, включающий распределенный реестр обработанных объектов и механизм динамического перераспределения ролей между роботами. Проведенное моделирование показало сокращение среднего времени выполнения полного набора тестовых задач на 5,75 % по сравнению с базовым подходом.

Для подмножества задач, в которых предлагаемый метод может в полной мере реализовать свои преимущества, сокращение времени обработки достигает 10,34 %. **Заключение.** Модернизированный метод управления роем роботов позволяет более эффективно распределить задачи и повысить степень параллелизма обработки. Это имеет высокую практическую значимость для применения в агротехнологических роботизированных системах, особенно при использовании бюджетной техники. Перспективы развития включают адаптивное управление, интеграцию с другими методами оптимизации и расширение подхода на гетерогенные рои.

Ключевые слова: сельскохозяйственные роботы, БПЛА, роевое управление, передача данных, релейная связь, распределенный реестр

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Таранов А.Ю. Разработка системы релейного управления роем роботов для сельскохозяйственных работ. *Инженерные технологии и системы.* 2026;36(3):500–517. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.26363.500-517>

INTRODUCTION

Agriculture is a strategically significant sector of any economy, because of it provides food security, ensures regional development, and maintains rural employment. Improving the efficiency of agricultural production remains a key problem, especially considering the growing demands for the volume and quality of production, and the need to reduce labor costs. Traditional methods of field cultivation and crop tending require significant time and human resources that limit the scale and speed of operations, particularly over large areas.

One of the most promising approaches to solving this problem is the automation of agricultural processes using robotic systems. Automation increases the accuracy and speeds up the execution of operations, and optimizes the use of resources. In recent years, there has been active implementation of unmanned aerial vehicles, autonomous land robots, and swarm control systems. These technologies enable the execution of a wide range of tasks, including the inspection of agricultural lands, monitoring crop conditions, assessing soil moisture and plant health, chemical treatment of crops, and many others.

The use of robots processing agricultural areas, such as fields, orchards, and pastures, where cyclic operations must be performed regularly, is of particular importance. In these cases, controlling robots as part of a swarm makes it possible to distribute the tasks among individual robots and perform these tasks in parallel reducing the time required to process large areas and decreasing labor and equipment costs. However, existing swarm control methods have a number of limitations, namely, many methods require expensive devices, provide limited coordination over large areas, or do not consider the potential for optimal task distribution when using budget robots. These issues significantly constrain the practical application of swarm systems in general and in agriculture in particular that is especially relevant for small and medium-sized farms.

In this and previous articles, the term *budget robots* refers to mass-produced, compact, autonomous or semi-autonomous robotic systems designed to minimize the

unit cost while maintaining a basic set of navigation and sensing functions enough to perform typical agricultural tasks.

These platforms include inexpensive unmanned aerial vehicles and mobile land robots of consumer-level, whose cost is several times lower than that of semi-professional systems and approximately by 1–3 orders of magnitude lower than of specialized industrial solutions. The significant difference in cost enables the use of a larger number of robots in a swarm to scale task execution while maintaining overall system efficiency. At the same time, low-cost platforms remain financially accessible for small and medium-sized farms, where budget constraints are a critical factor.

The term *budget robots* is not term of marketing, but it is used in a strictly applied context meaning economically accessible robotic systems that allow scaling the system by increasing the number of robots rather than by increasing the complexity and cost of individual units.

Previously presented by the author and colleagues concept and method of using a swarm of low-cost robots with relay-based communication, have demonstrated significant advantages over using a single expensive robot [1; 2].

The aim of the study was to develop an improved method capable of achieving higher performance while relying on the same core idea: the effective use of less expensive robot models while maintaining the same level of reliability and increasing swarm productivity.

The study objectives include the development of an improved swarm control method with relay-based communication and the implementation of a distributed ledger of processed objects. A further task is the design of a mechanism for dynamic redistribution of roles among robots within the swarm, and the development and implementation of a software simulation model of the system. The study also includes the execution of computational experiments to evaluate the effectiveness of the proposed method, followed by a comparative analysis with the baseline control method and statistical processing of the obtained results.

LITERATURE REVIEW

The search for a simple yet effective way to organize the operation of a robot swarm for processing areal objects is a highly relevant problem, as evidenced by the considerable number of publications devoted to this topic. However, the studies presented in this area have not sufficiently considered the issue from the perspective of using budget devices while simultaneously ensuring a high level of system reliability.

The analysis of the scientific and technical literature has shown that the existing articles in this area can be conditionally divided into several groups.

The first group includes the studies in which the authors consider relay-based data transmission over long distances using robots organized into a swarm [3–5]. Additional studies investigate communication performance and data throughput in multi-hop UAV relay networks [6; 7]. These studies are difficult to use for solving the problem considered in this article, since they primarily address the formation of static or low-dynamic robot swarm configurations, when active robot movement is generally not assumed. In addition, in this group of studies there are often used computationally intensive algorithms

that raise questions regarding their applicability when using budget-level computing equipment.

The second group consists of the studies that investigate the approaches based on the use of separately designated relay robots [8–10]. It should be acknowledged that this is a very simple and reliable approach. However, at the same time, the acquisition of dedicated robots solely for relaying functions undermines the budget-oriented nature of such systems: resources that could otherwise be used to solve the primary task processing agricultural land) must instead be allocated to building an infrastructure that ensures the operability of the robotic swarm system.

In addition to the groups mentioned above, there is a number of studies that employ predefined behavioral scenario constructions to organize robot swarm operation. As a rule, these approaches rely on efficient but very resource-intensive algorithms (for example, those reduced to solving multiple traveling salesman problems [11] or based on multi-agent learning methods [12]). This makes it impossible to ensure dynamic swarm reconfiguration without the use of expensive computing equipment that excludes these solutions from the category of budget-oriented ones. It is possible to apply an approach based on the preliminary computation of all possible scenarios, which take into account various system failures and corresponding responses [13]. However, this approach is extremely difficult to implement, because of its high computational complexity, even for relatively small robot swarms.

A separate category of the studies is focusing on the reconfiguration capabilities of robot swarms [14–16]. Additional studies consider formation reconfiguration and structural control strategies for multi-robot systems in complex environments [17–19]. Another group of studies is devoted to swarm resilience, collision avoidance, and recovery mechanisms under disturbances and attacks [20–22]. Finally, several studies consider general approaches to swarm topology organization and reconfiguration optimization methods [23; 24]. Although the number of these studies is quite large, all of them either do not consider the possibility and/or necessity of relay-based communication (which is the basis for achieving a low-budget solution) or are computationally complex, or require additional extensive research aimed at adapting these methods to comply with existing constraints and requirements.

Based on the review of scientific and technical sources, the following conclusions can be drawn:

- Since the publication of the previous article on this topic, there have been no fundamentally new approaches or results that would provide a solution to the problem under consideration;
- A large number of robot swarm organization methods applicable to areal object processing satisfy only one criterion: either budget minimization or reliability assurance;
- Attempts to combine different methods in order to obtain a hybrid solution that satisfies both requirements are likely to lead either to conflicts between the requirements of the combined technologies or to significant time and resource expenditures.

Despite the significant number of studies in the field of swarm robotics, several important aspects remain insufficiently explored. In particular, there is a lack of approaches that simultaneously integrate relay-based communication, low-cost hardware

constraints, and dynamic task reconfiguration within a unified framework. Existing methods typically address these aspects separately, focusing either on communication efficiency, system reliability, or optimization of swarm behavior, but not on their joint implementation under strict budget limitations.

Moreover, the behavior of swarm systems operating under conditions of distributed relay communication with continuously changing topology is not yet fully understood, especially in scenarios involving resource-constrained robotic platforms. This creates a gap between theoretically developed models and their practical applicability in real-world agricultural environments.

These limitations define the necessity of developing new approaches that combine relay-based coordination, distributed control, and adaptive reconfiguration while maintaining computational and hardware efficiency.

Based on these considerations, there is a clear need for the development of a new improved method that would satisfy all the stated requirements. The approach proposed in this article is aimed at addressing these limitations by combining relay-based coordination, distributed control, and adaptive reconfiguration while maintaining computational and hardware efficiency.

MATERIALS AND METHODS

Description of the baseline method

As a basis for developing the improved swarm control method with relay-based communication, there was used a previously developed method [2], which ensures coordinated robot behavior based on the mFabrik algorithm and data exchange among the robots within the swarm.

The swarm operation scheme is based on forming a chain in which the terminal robot (the one farthest from the base) is assigned as the leader, while the remaining robots act as followers.

The leader task is to process the assigned area object within its area of responsibility by visiting predefined points and performing the required actions at those points (mapping [25], monitoring [26], chemical treatment of crops [27], pollination [28], etc.).

The primary task of the followers is to ensure communication between the leader and the base, for example, for transmitting monitoring data or progress reports on task execution. In addition, the followers, within their capabilities, perform tasks similar to those of the leader in their own areas of responsibility in parallel (without compromising their primary function of maintaining communication between the base and the swarm).

After completing its assigned tasks, the leader transfers the leadership role to the nearest follower in the chain and returns to the base. The swarm operation then continues with the new leader.

During operation, the movement of all robots is determined by the leader robot, which constructs the trajectories of the other swarm members using a modified Fabrik algorithm (Forward and Backward Reaching Inverse Kinematics). Modified Fabrik, or mFabrik, is a modified version of the algorithm that allows robots to change the distance between each other while keeping it within specified limits, that is, without exceeding the communication range between robots.

This algorithm enables the search for the required robot positions through a computationally simple problem of finding a point on a line. Despite the iterative nature of the algorithm, this provides a significant advantage over other, more computationally demanding methods used for the same purposes: Fabrik and mFabrik are several times faster than the Follow-the-Leader method [29], an order of magnitude faster than the Cyclic Coordinate Descent method [30], and several orders of magnitude faster than approximation methods based on Jacobian matrices (Jacobian Transpose¹, Damped Least Squares (DLS)², DLS with Singular Value Decomposition³, Selectively DLS [31], etc.).

During operation, robots may be in one of four states (modes): normal operation, task is completed, task is completed with failure, and loss of one or more robots in the swarm for any reason. In each state, robot behavior is determined by its role – leader or follower. A detailed description of the FABRIK algorithm [32], as well as the mFabrik algorithm and the swarm control method based on it [2], is provided by their authors in the corresponding publications.

Analysis of the baseline method and identified limitations

The results of the baseline method analysis, carried out using a software model implementing its principles, revealed the presence of two characteristic features. Although these features do not have a critical impact on the overall method performance, elimination of them could potentially increase the method effectiveness and further enhance its performance.

First, during the process of assigning target areas to the robots within the swarm, a situation may arise when multiple robots simultaneously select the same target point. Since, at the target assignment stage, each robot makes decisions based only on locally available information and current optimality criteria, the system lacks a mechanism to prevent such overlaps. As a result, a collision is formed, representing competition for a limited resource in the form of an object (point) available for processing.

Upon reaching the selected point, only one robot can perform the actual calculating, while the others, arriving later, are forced to abandon the operation and initiate a repeated search for a new target. This process leads to inefficient consumption of time and fuel resources, as the functional capabilities of such robots remain underutilized during movement. As a result, these effects reduce the overall productivity of the swarm by limiting the degree of process parallelism.

Second, in the original version of the method, each leader robot returns to the base after completing its assigned tasks. If, for any reason, the swarm loses one or more active

¹ Balestrino A., De Maria G., Sciavicco L. Robust Control of Robotic Manipulators. In: 9th IFAC World Congress: A Bridge Between Control Science and Technology: IFAC Proceedings Volumes. Budapest; 1984. pp. 2435–2440. [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)61347-8](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)61347-8)

² Wolovich W.A., Elliott H. A Computational Technique for Inverse Kinematics. In: The 23rd IEEE Conference on Decision and Control: IEEE. Las Vegas: IEEE; 1984. pp. 1359–1363. <https://doi.org/10.1109/CDC.1984.272258>; Wampler C.W. Manipulator Inverse Kinematics Solutions Based on Vector Formulations and Damped Least-Squares Methods. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. 1986;16(1):93–101. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1986.289285>

³ Nakamura Y., Hanafusa H. Inverse Kinematic Solutions with Singularity Robustness for Robot Manipulator Control. *Transactions ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. 1986;108(3):163–171. <https://doi.org/10.1115/1.3143764>; Baillieul J. Kinematic Programming Alternatives for Redundant Manipulators. In: Proceedings. 1985 IEEE International Conference on Robotics and Automation. St. Louis: IEEE; 1985; pp. 722–728. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.1985.1087234>

robots, the system compensates for these losses by dispatching robots from the base that have already completed their part of the task (provided that sufficient fuel reserves are available). However, this approach contradicts the general concept of parallel task execution: the robot expends fuel first to return to the base and then again to re-enter the operational area. Although, during movement, it may additionally process parts of the assigned areal object, this remains a secondary function and does not make such an operational mode truly efficient.

Proposed modifications

In using the baseline method, the process of assigning target areas to the robots within the swarm often turns out to be suboptimal. There are numerous methods to solve this problem, including resource contention and coordination approaches in multi-agent systems⁴ [33], game-theoretic and optimization-based allocation strategies [34], and concurrency orchestration techniques for swarm systems [35], but they are computationally demanding. As a simpler and more efficient solution, the use of a distributed ledger is proposed.

In the proposed approach, robots pre-book a specific portion of the areal object, before starting their movement, effectively securing it for themselves. The robot that successfully accomplishes this begins to move to its new position. Other robots that could have claimed the same location select a different target point for processing. This approach can be implemented using synchronization mechanisms analogous to semaphores or mutexes, which ensure the atomicity of resource pre-booking operations.

The recommendations of the International Telecommunication Union, ITU-T Y.2345⁵ and ITU-T Y.2348⁶, consider mechanisms for coordinating access to limited resources in distributed digital environments. The Y.2345 document defines approaches for monitoring resource status, automating their allocation, and preventing conflicts among participants, which functionally corresponds to a semaphore model for restricting parallel access. The Y.2348 standard describes an architecture for the shared use of network resources based on a distributed ledger, within which smart contracts provide coordinated access control, constraint enforcement, and conflict resolution. The combination of these features allows the distributed ledger to be regarded as an effective mechanism for coordinating access to limited resources, functionally equivalent to classical semaphores.

Moreover, distributed ledger can be implemented with low resource requirements, making it ideally suited for the problem under consideration⁷.

⁴ Youssefmir M., Huberman B. Resource Contention in Multiagent Systems. In: The proceedings of First International Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS 1995). San Francisco: AAAI Press; 1995. pp. 398–403.

⁵ Recommendation ITU-T Y.2345 (05/2023). Scenarios and Requirements of Network Resource Sharing based on Distributed Ledger Technology. Available at: <https://www.itu.int/epublications/publication/itu-t-y-2345-2023-05-scenarios-and-requirements-of-network-resource-sharing-based-on-distributed-ledger-technology> (accessed 16.12.2025).

⁶ Recommendation ITU-T Y.2348 (03/2025). Functional Architecture of Network Resource Sharing Based on Distributed Ledger Technology. Available at: <https://www.itu.int/epublications/publication/itu-t-y-2348-2025-03-functional-architecture-of-network-resource-sharing-based-on-distributed-ledger-technology> (accessed 16.12.2025).

⁷ Rodina A.A. [Consensus Mechanisms in Distributed Ledger Technology for Monitoring Systems]. In: XIV All-Russian Multiconference on Control Problems (MKPU-2021): conference proceedings paper. Rostov-on-Don: Southern Federal University; 2021; pp. 123–126. (In Russ.) <https://elibrary.ru/rbxflj>

The second feature of the baseline method, as noted earlier, is the not always optimal behavior of the leader robots. A solution to this problem is the introduction of an additional operational mode in the robot behavior model – the satellite mode.

After completing its assigned tasks, the leader, as in the baseline method, relinquishes its leadership role by passing it to the next robot, but instead of returning to the base, it enters the satellite mode. In this mode, the former leader begins operating by moving around the current leader, assisting in the processing of its portion of the areal object and thereby parallelizing the process.

Since the current leader will eventually complete its own tasks and transfer leadership further, it also enters satellite mode in the same manner. That is, the number of satellites can, in general, be arbitrary, and accordingly, a procedure regulating their behavior is required to maximize the overall efficiency of the robotic system. In particular, the satellite robots must: not interfere with the work of the current leader; not interfere with each other; maintain connection with the swarm.

To satisfy all the above requirements, the following satellite robot behavior model is proposed.

All satellites calculate target points for their movement, so that they are located at a sufficient distance from the leader. The satellite distance R_{sat} from the leader is chosen to maximize communication efficiency and prevent conflicts. For example, it could be half the length of the stable communication range. After obtaining the target point, a satellite robot assigns as its goal the nearest point of the areal object that requires processing. This ensures the first requirement – minimizing interference with the leader's work.

It is evident that, under this behavioral model, the satellite robots will tend to position themselves on a circle. Accordingly, to satisfy the second requirement – minimizing interference among satellites – it is sufficient to arrange the leader – satellite vectors for each satellite at angles of $360^\circ/N$, where N is the number of satellites.

Finally, to satisfy the last requirement, a satellite robot must abandon its current task and move toward the leader if it comes too close to the limits of the communication zone R_{comm} (i. e., beyond a certain return distance R_{return}). Proximity to this limit should be determined empirically, based on current conditions, for example, those affecting the quality of the wireless connection at a given place and time.

A diagram illustrating the described principles for forming the swarm subsystem leader – satellites is shown in Figure 1.

The described satellite robot behavior can be implemented as follows. A notional circle is constructed around the leader, on which target points are evenly distributed in a quantity equal to the number of satellites.

Since the problem of evenly placing N points on a circle has multiple solutions, it is desirable to find the most optimal one. The criterion of optimality in this case is the path length that the satellites need to travel to reach these points. Minimizing this value allows the swarm to expend the least amount of fuel, thereby increasing the overall system operating time.

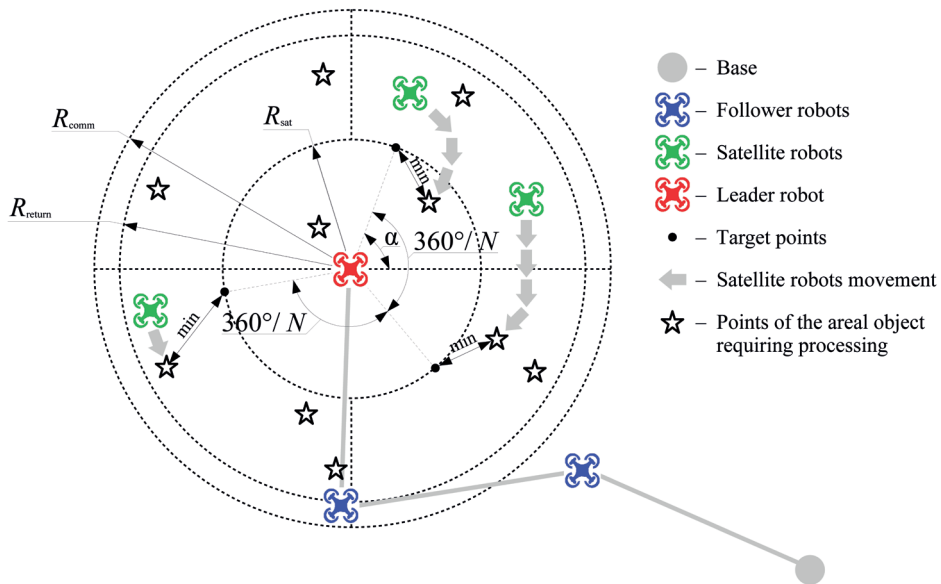


Fig. 1. General diagram of the satellite robots' operation

Note: R_{return} – return distance threshold for satellite robots, m; R_{comm} – communication range radius, m; R_{sat} – satellite distance from the leader, m; min – minimum distance between satellite robot's current target point and closest target point to process, m; α – rotation angle of the satellite constellation, °; $360^\circ/N$ – angular spacing between adjacent satellites in an ideal uniform configuration, ° (where N is the number of satellites).

Source: Figure 1 is compiled by the author using OpenOffice Draw.

Ideally, the satellite robots should be positioned on the circle around the leader at equal angular intervals. Essentially, all solutions differ only by the rotation of the satellite constellation around the circle's center. Accordingly, the search for the optimal orientation of such a constellation reduces to selecting the angle α defining this rotation. Any one-dimensional numerical optimization method can be used for this purpose.

Next, for each target point, the nearest point of the areal object requiring processing (i.e., to be visited by a swarm robot) is determined. The assignment of these points to the satellite robots can be carried out using any algorithm for solving optimal assignment problems.

The choice of specific algorithms, including methods of one-dimensional numerical optimization and optimal assignment, is made taking into account the technical characteristics of the robotic system, accuracy requirements, and other constraints.

Implementation

To verify the proposed approach, a software model of the swarm was created, implemented in Python (Fig. 2).

Since the proposed method does not assume the use of strictly defined algorithms, their selection is carried out according to the implementation conditions. In the software model developed to verify the method, the following algorithms were used:

- The angle α , which defines the rotation of the satellite robot constellation around the leader, is determined using a one-dimensional numerical optimization method – the bounded golden-section search⁸;
- The determination of target points for the satellites is performed using the Kuhn – Munkres algorithm (the Hungarian algorithm)⁹.

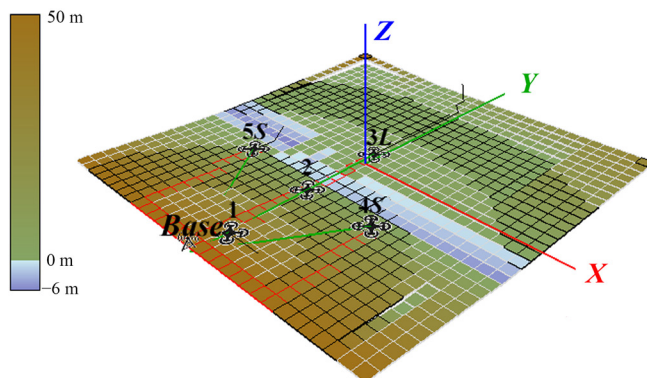


Fig. 2. Software model in operation (example with a swarm of 5 robots and an areal object with dimensions of 3,000×3,000 meters)

Note: L – leader robot; S – satellite robot; numerals denote robot IDs.

Source: Figure 2 is a screenshot of the developed simulation program.

The following parameters should also be noted:

- The satellite distance R_{sat} , which defines the optimal radius for positioning satellites around the leader, was chosen as 5 diagonals of the rectangular sections into which the areal object is divided, with the points requiring processing (visitation) located at their centers;
- The return distance $R_{\text{return}} = 0.99 \times R_{\text{comm}}$, which provides a reserve to safely keep the satellite within the reliable communication zone during unpredictable maneuvers of the leader robot, external disturbances (e. g., strong wind gusts), and possible errors in coordinate determination.

Methodology for testing and evaluating efficiency

The study did not aim to compare the performance of a swarm of budget robots with that of a single expensive robot. The effectiveness of the swarm approach was substantiated and demonstrated in a previous publication [2]. The main focus was on comparing the baseline method with the newly proposed improved method. This approach allows evaluating the impact of introduced changes and innovations on the swarm's performance under various conditions and operational scenarios.

⁸ Pronzato L., Wynn H.P., Zhigljavsky A.A. A Generalized Golden-Section Algorithm for Line Search. *IMA Journal of Mathematical Control and Information*. 1998;15(2):185–214. <https://doi.org/10.1093/imamci/15.2.185>

⁹ Munkres J. Algorithms for the Assignment and Transportation Problems. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*. 1957;5(1):32–38. <https://doi.org/10.1137/0105003>

The methods were compared according to the following scheme: for each experiment, a set of maps of different sizes and varying numbers of robots were selected. For each combination, swarm operation was simulated, and a key metric was recorded – the time required to complete the assigned tasks. This metric indicates task execution speed and allows evaluating the efficiency of the task allocation method used among the robots.

The potentially new software model is capable of handling three-dimensional landscapes; however, only two-dimensional (flat) maps were used for method comparison, as the previous version implementing the baseline method did not have this capability. This ensured equal conditions for comparing the methods.

There was no guarantee that all maps would be fully processed, as some maps were intentionally designed with conditions under which the robots would not be able to complete the task entirely. This experimental setup allows testing the methods' resilience to unforeseen situations that may arise in real-world operation, for example, when robots are forced to return to the base without completing the processing of an areal object due to communication range limitations.

This methodology allows not only evaluating the overall effectiveness of the swarm but also identifying the advantages and limitations of each method under random and potentially extreme conditions. Such comparison provides a quantitative basis for analysis and enables an objective assessment of how the proposed modifications enhance the robotic system's efficiency.

Initial conditions and test parameters used to evaluate the proposed method:

- Areal object sizes: 1,000×1,000 m, 2,000×2,000 m, 3,000×3,000 m, 5,000×5,000 m, 7,000×7,000 m, and 10,000×10,000 m (each object was divided into 100×100 m sections, with a processing point located at the center of each section);
- Number of robots in the swarm: 1–3, 5, 7, and 10.

The tests comprised 36 trials, covering all combinations of object sizes and swarm sizes.

The software model operated with a homogeneous swarm of robots possessing identical characteristics: stable communication range of 1,500 m, movement speed of 16 m/s, fuel reserve sufficient for 2,500 seconds of flight, and a coefficient for increased fuel consumption during hovering due to the absence of translational lift¹⁰ – 1.15 (it was assumed that a swarm of aerial robots was modeled, although for ground robots, this coefficient could potentially be set to 1.00).

RESULTS

As a result of the conducted study, data were obtained that make it possible to compare the baseline method with its improved version proposed in work (Fig. 3).

As can be seen from the diagram presented below, the improved method demonstrates a clear advantage in scenarios where the number of robots is sufficiently large (the lower-left region of the diagram below its main diagonal), such that the surplus of robots enables faster task completion through parallel execution.

¹⁰ Headquarters, Department of the Army. Fundamentals of Flight. Field Manual FM 3-04.203.

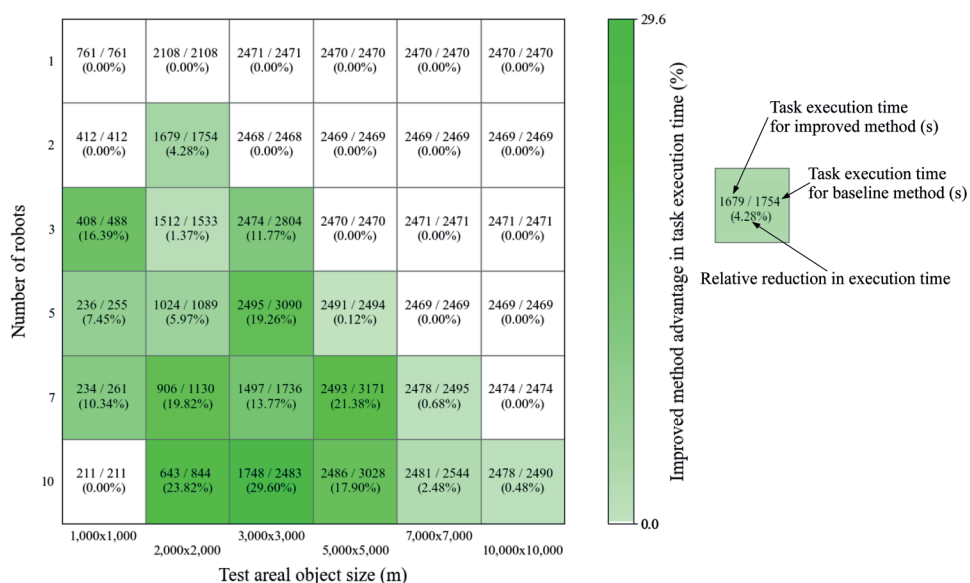


Fig. 3. Comparison of execution times for equivalent tasks using the baseline and improved methods

Source: Figure 3 is a Python-generated plot, enhanced in OpenOffice Draw.

The only anomalous values in this areal correspond to tests with 1, 2, and 10 robots processing an area object of size 1,000×1,000 m. However, these anomalies have a simple and logically consistent explanation.

In the first case (1 robot), the improved method cannot demonstrate its advantages, since only a single robot is present in the system and no other robots are available to act as satellites. As a result, the final outcome fully coincides with that of the baseline method.

In the second case (2 robots), the size of the test area is too small: after completing its assigned tasks, the leader transitions into the satellite mode, but does not have sufficient time to influence the process, as the new leader completes all remaining work before any noticeable effect can occur.

The third case (10 robots) demonstrates that an excessive number of robots operating within a limited area begins to interfere with swarm operation, thereby reducing all advantages of the improved method to zero, although at first glance an increase in the number of robots would be expected to accelerate task execution. Moreover, in the general case, these conditions may even result in the baseline method being more efficient.

Overall, the obtained results indicate that the proposed improved swarm control method with relay-based communication outperforms the baseline method in terms of execution speed. The average task completion time was reduced by 5.75%.

It is worth noting separately that, when comparing the methods, the quality of task performance remained the same in both cases.

To assess statistical significance, a paired Student's *t*-test was performed, yielding a *t*-statistic of approximately 3.16 and a significance level (*p*-value) of approximately 0.0032, indicating a statistically significant reduction in execution time. It should be noted that the paired Student's *t*-test is robust to moderate deviations from normality,

and the number of observations ($n = 36$) is sufficient for its application. Nevertheless, to verify the normality of the differences, a Shapiro – Wilk test was conducted, which revealed some deviation from a normal distribution. Consequently, the nonparametric Wilcoxon signed-rank test was additionally applied, confirming the statistical significance of the observed speedup (test statistic = 0, p -value ≈ 0.0002).

Thus, the experimental data demonstrate that the proposed method provides a stable and statistically significant reduction in task execution time compared to the baseline method.

At the same time, the obtained results reflect the effect across the entire set of test tasks, including those in which the method cannot fully realize its advantages. For the subset of tasks in which the method is able to fully exploit its capabilities, the average reduction in execution time reaches 10.34% and remains statistically significant, as confirmed by both the Student's t-test and the Wilcoxon test.

DISCUSSION

The conducted study has demonstrated that the proposed improved swarm control method with relay-based communication provides more efficient task distribution and reduces the time required to process agricultural areal objects compared to the baseline method. The improvement is mainly achieved through the introduction of a distributed ledger of processed objects, which eliminates conflicts in target assignment among robots and increases the degree of parallel task execution. In addition, the satellite robot mechanism contributes to further parallelization of processing while preserving communication stability and coordination within the swarm.

The proposed improved method, building upon the previously suggested swarm control approach, introduces new coordination elements, allowing the potential of budget robotic systems to be more fully realized. This new approach enables more optimal task distribution among robots through enhanced coordination and data exchange within the swarm, reducing operation times and the number of units required. Thus, the method allows for increased efficiency in processing areal objects without increasing capital or operational costs.

In the available literature on swarm robotic control, the considered models predominantly rely on direct or quasi-global communication among robots and do not account for relay-based data transmission or the use of a distributed task ledger. For this reason, a direct quantitative comparison of the obtained results with those reported by other researchers under a comparable problem formulation is limited. Nevertheless, the effects identified in the present study—namely, an increased level of parallel task execution and a reduction in processing time—are qualitatively consistent with the general findings reported in studies focused on relay-based communication and connectivity maintenance in mobile robot swarms [7; 8; 11]. These results are also consistent with studies addressing dynamic topology organization and swarm maintenance [22]. Further agreement¹¹ can be observed with research on decentralized resource allocation and coordination [33; 34] mechanisms, as well as on concurrency orchestration in robot swarms [35].

¹¹ Youssefmir M., Huberman B. Resource Contention in Multiagent Systems.

To ensure the consistency of the results and confirm the applicability of the proposed method, robots with characteristics similar to those previously described in [2] are modeled in this study.

Experimental data obtained through simulation confirm that the improved method achieves a statistically significant reduction in task execution time, with the effect being most pronounced for swarms of medium and large sizes. An analysis of anomalous scenarios revealed limitations of the method at very small or excessively large swarm sizes, enabling more accurate identification of the conditions under which the method demonstrates maximum efficiency.

A comparison of the obtained results with the stated objectives of the study indicates that the primary goal has been achieved: improving an existing approach in a manner that enables efficient use of budget robotic platforms while maintaining high swarm performance. Achieving this result opens opportunities for large-scale deployment of robotic systems in agriculture, particularly in small and medium-sized farms, where budget constraints are a critical factor.

The behavior of the proposed method in boundary (extreme) operating modes of the swarm deserves separate consideration. Such modes were not the subject of direct simulation within the scope of the present study, but they are fundamentally important from the standpoint of system reliability.

At an extremely small number of robots (1–2 units), the algorithm degrades to the baseline method, since the mechanisms of role distribution and formation of satellite robots cannot be fully realized. In this case, the expected performance does not deteriorate compared to the baseline approach, but it also does not demonstrate any advantages, which is consistent with the obtained experimental data.

In the opposite extreme case (an excessively high density of robots in a confined area), mutual interference effects, increased coordination overhead, and a decrease in the efficiency of parallel task execution may occur. As demonstrated by the simulation results for the case of 10 robots operating in a $1,000 \times 1,000$ m area, this effect can neutralize the gain provided by the improved method and, in certain configurations, may lead to its performance being comparable to or even inferior to that of the baseline approach.

In scenarios involving partial robot failures or temporary loss of communication between robots in the swarm, it was assumed that the mechanisms of the distributed ledger and role reassignment would allow the system to adaptively redistribute unfinished subtasks among the remaining robots. Within the logic of the algorithm, this may lead to an increase in the overall task completion time; however, it does not result in a complete loss of swarm operability, provided that the connectivity of the communication graph is preserved.

Under conditions of abrupt changes in the external environment (emergence of obstacles, deterioration of weather conditions, changes in terrain traversability, etc.), a temporary decrease in efficiency is expected due to the disruption of the initial processing plans, after which the system stabilizes through the assignment of new leaders and task redistribution. A detailed investigation of these modes represents a separate direction for future research.

CONCLUSION

The article demonstrates that the use of a swarm with the improved control method provides greater efficiency to a greater efficiency with similar resource expenditures, representing a novel approach compared to the previously proposed method. This opens up opportunities for more extensive implementation of robotics in agriculture.

The practical significance of this study is in the fact that the proposed method reduces time and labor costs associated with processing agricultural areal objects without increasing expenditures on robotic equipment. The approach can be adapted for both unmanned aerial vehicles and autonomous land robots, thereby expanding the range of agricultural tasks that can be performed swarm-based robotic systems.

Promising directions for future research include:

- Optimization of satellite robot behavior under dynamic external conditions, such as terrain, weather factors, and obstacles;
- Development of adaptive real-time task redistribution algorithms to handle failures or unforeseen changes in the operational area;
- Investigation of integration possibilities with other planning and optimization methods to further improve overall swarm performance;
- Formulation of methodological guidelines for deploying swarm systems under various operating conditions;
- Application of the proposed approach to heterogeneous swarm systems composed of robots with different characteristics and functional capabilities.

In summary, this work demonstrates that employing an improved swarm control method for budget robotic platforms enhances the efficiency of area object cultivating, ensures reliable system operation, and provides a foundation for the further development of robotic agricultural technologies. It is expected that the continued implementation of these solutions will contribute to the expansion of agricultural automation, increased productivity, and reduced labor costs.

REFERENCES

1. Taranov A.Yu., Ostroukhov A.Yu. Increasing Energy Efficiency in Area-Based Tasks Resolving by an Autonomous Robots Swarm through Relay Communications. *Izvestiya Tula State University*. 2023;(11):65–70. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/bipbpg>
2. Taranov A.Yu., Rodina A.A. A Control Method for Reconfigurable Swarm of Mobile Robots with Relay Communication in Order to Monitor Areal Objects. *Robotics and Technical Cybernetics*. 2025;13(1):41–49. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/ohganw>
3. Sait A., Al-Hadhrami T., Saeed F., Basurra S., Qasem S.N. Laser Communications System with Drones as Relay Medium for Healthcare Applications. *PeerJ Computer Science*. 2024;(10):e1759. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.1759>
4. Fu S., Zhao L., Su Z., Jian X. UAV Based Relay for Wireless Sensor Networks in 5G Systems. *Sensors*. 2018;18(8):2413. <https://doi.org/10.3390/s18082413>
5. Suetsugu A., Madokoro H., Nagayoshi T., Kikuchi T., Watanabe S., Inoue M., et al. Development and Field Testing of a Wireless Data Relay System for Amphibious Drones. *Drones*. 2024;8(2):38. <https://doi.org/10.3390/drones8020038>
6. Tajima Y., Hiraguri T., Matsuda T., Imai T., Hirokawa J., Shimizu H., et al. Analysis of Wind Effect on Drone Relay Communications. *Drones*. 2023;7(3):182. <https://doi.org/10.3390/drones7030182>

7. Fan J., Cui M., Zhang G., Chen Y. Throughput Improvement for Multi-Hop UAV Relaying. *IEEE Access*. 2019;(7):147732–147742. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2946353>
8. Yanmaz E. Positioning Aerial Relays to Maintain Connectivity During Drone Team Missions. *Ad Hoc Networks*. 2022;(128):102800. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2022.102800>
9. Burdakov O., Doherty P., Holmberg K., Kvarnström J., Olsson P.-M. Positioning Unmanned Aerial Vehicles As Communication Relays for Surveillance Tasks. In: Conference Paper: Proceedings of Robotics: Science and Systems. Seattle: The MIT Press; 2009. <https://doi.org/10.15607/RSS.2009.V.033>
10. Tao C., Liu B. Distributed Coordinated Motion Control of Multiple UAVs Oriented to Optimization of Air-Ground Relay Network. *Scientific Reports*. 2024;(14):31501. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-83243-4>
11. Yanmaz E. Dynamic Relay Selection and Positioning for Cooperative UAV Networks. *IEEE Networking Letters*. 2021;3(3):114–118. <https://doi.org/10.1109/LNET.2021.3080403>
12. Wang Y., Cui Y., Yang Y., Li Z., Cui X. Multi-UAV Path Planning for Air-Ground Relay Communication Based on Mix-Greedy MAPPO Algorithm. *Drones*. 2024;8(12):706. <https://doi.org/10.3390/drones8120706>
13. Taranov A.Yu. Algorithm of Operation of a Reconfigurable Switch Based on Multi-Agent Interaction. *Proceedings of Universities. Electronics*. 2025;30(2):194–207. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <http://ivuz-e.ru/issues/.%D0%A2%D0%BE%D0%BC%2030%20%E2%84%962/> (accessed 16.08.2025).
14. Sarabia N.S., Gashaw H., Wubben J., Hernández-Orallo E., Calafate C.T. A Safe In-Flight Reconfiguration Solution for UAV Swarms Based on Attraction/Repulsion Principles. *Electronics*. 2025;14(10):3799. <https://doi.org/10.3390/electronics14193799>
15. Liao J., Cheng J., Xin B., Luo D., Zheng L., Kang Y., et al. UAV Swarm Formation Reconfiguration Control Based on Variable-Stepsize MPC–APCMPIO Algorithm. *Science China Information Sciences*. 2023;(66):212207. <https://doi.org/10.1007/s11432-022-3735-5>
16. Bui D.N., Phung M.D., Duy H.P. Self-Reconfigurable V-Shape Formation of Multiple UAVs in Narrow Space Environments. In: 2024 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII). Ha Long: IEEE; 2024. pp. 1006–1011. <https://doi.org/10.1109/SII58957.2024.10417519>
17. Zhang H., Zhang G., Yang R., Feng Z., He W. Resilient Formation Reconfiguration for Leader-Follower Multi-UAVs. *Applied Sciences*. 2023;13(13):7385. <https://doi.org/10.3390/app13137385>
18. Roy D., Chowdhury A., Maitra M., Bhattacharya S. Multi-Robot Virtual Structure Switching and Formation Changing Strategy in an Unknown Occluded Environment. In: 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Madrid: IEEE; 2018. pp. 4854–4861. <https://doi.org/10.1109/IROS.2018.8594438>
19. Cheah C.C., Hou S.P., Slotine J.J.E. Region-Based Shape Control for a Swarm of Robots. *Automatica*. 2009;45(10):2406–2411. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2009.06.026>
20. Marek D., Biernacki P., Szyguła J., Domański A., Paszkuta M., Szczygieł M., et al. Collision Avoidance Mechanism for Swarms of Drones. *Sensors*. 2025;25(4):1141. <https://doi.org/10.3390/s25041141>
21. Hu T., Zong Y., Lu N., Jiang B. Dynamic Recovery and a Resilience Metric for UAV Swarms Under Attack. *Drones*. 2025;9(8):589. <https://doi.org/10.3390/drones9080589>
22. Gaydamaka A., Samuylov A., Moltchanov D., Ashraf M., Tan B., Koucheryavy Y. Dynamic Topology Organization and Maintenance Algorithms for Autonomous UAV Swarms. *IEEE Transactions on Mobile Computing*. 2024;23(5):4423–4439. <https://doi.org/10.1109/TMC.2023.3293034>
23. Qiuyun T., Hongyan S., Hengwei G., Ping W. Improved Particle Swarm Optimization Algorithm for AGV Path Planning. *IEEE Access*. 2021;(9):33522–33531. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3061288>
24. Yang Z., Yang F., Mao T., Xiao Z., Han Z., Xia X. Reconfiguration for UAV Formation: A Novel Method Based on Modified Artificial Bee Colony Algorithm. *Drones*. 2023;7(10):595. <https://doi.org/10.3390/drones7100595>
25. Abrahams M., Sibanda M., Dube T., Chimonyo V.G.P., Mabhaudhi T. A Systematic Review of UAV Applications for Mapping Neglected and Underutilised Crop Species’ Spatial Distribution and Health. *Remote Sensing*. 2023;15(19):4672. <https://doi.org/10.3390/rs15194672>

26. Zhang F., Guo A., Hu Z., Liang Y. A Novel Image Fusion Method Based on UAV and Sentinel-2 for Environmental Monitoring. *Scientific Reports*. 2025;(15):27256. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-13049-5>
27. Li W., Luo Y., Jiang P., Dong X., Tang K., Liang Z., et al. A Sustainable Crop Protection through Integrated Technologies: UAV-based Detection, Real-Time Pesticide Mixing, and Adaptive Spraying. *Scientific Reports*. 2025;(15):35748. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-19473-x>
28. Zhang Q., Zhang Z., Manzoor S.H., Li T., Igathinathane C., Li W., et al. A Comprehensive Review of Autonomous Flower Pollination Techniques: Progress, Challenges, and Future Directions. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2025;(237):110577. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.110577>
29. Brown J., Latombe J.C., Montgomery K. Real-Time Knot-Tying Simulation. *The Visual Computer*. 2004;(20):165–179. <https://doi.org/10.1007/s00371-003-0226-y>
30. Canutescu A.A., Dunbrack R.L.Jr. Cyclic Coordinate Descent: A Robotics Algorithm for Protein Loop Closure. *Protein Science*. 2003;12(5):963–972. <https://doi.org/10.1110/ps.0242703>
31. Buss S.R., Kim J.S. Selectively Damped Least Squares For Inverse Kinematics. *Journal of Graphics Tools*. 2005;10(3):37–49. <https://doi.org/10.1080/2151237X.2005.10129202>
32. Aristidou A., Lasenby J. FABRIK: A Fast, Iterative Solver for the Inverse Kinematics Problem. *Graphical Models*. 2011;73(5):243–260. <https://doi.org/10.1016/j.gmod.2011.05.003>
33. Kirley M. Competition, Cooperation and Collective Behaviour: Resource Utilization in Non-Stationary Environments. In: *Ieee Wic Acm International Conference on Intelligent Agent Technology*. Compiegne: IEEE; 2005. pp. 572–578. <https://doi.org/10.1109/IAT.2005.55>
34. He Z., Sun Y., Feng Z. Research on Resource Allocation of Autonomous Swarm Robots Based on Game Theory. *Electronics*. 2023;12(20):4370. <https://doi.org/10.3390/electronics12204370>
35. Cowley A., Taylor C.J. Orchestrating Concurrency in Robot Swarms. In: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. San Diego: IEEE; 2007. pp. 945–950. <https://doi.org/10.1109/IROS.2007.4399426>

About the author:

Anton Yu. Taranov, Engineer of the Information Technologies and Control Processes Laboratory of the Department of Physics, Chemistry, and Computer Science, Federal Research Centre The Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences (41 Chekhov Ave., Rostov-on-Don 344006, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7337-8140>, Researcher ID: IUO-3909-2023, mailfortexas@mail.ru

The author has read and approved the final manuscript.

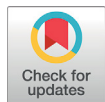
Submitted 25.12.2025; revised 23.01.2026; accepted 09.02.2026

Об авторе:

Таранов Антон Юрьевич, инженер лаборатории информационных технологий и процессов управления отдела физики, химии, информатики федерального исследовательского центра Южного научного центра Российской академии наук (344006, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, д. 41), ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7337-8140>, Researcher ID: IUO-3909-2023, mailfortexas@mail.ru

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 25.12.2025; поступила после рецензирования 23.01.2026;
принята к публикации 09.02.2026*

**ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ /
TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT**<https://doi.org/10.15507/2658-4123.26363.518-540>EDN: <https://elibrary.ru/mkgval>

УДК / UDK 63:633.358:004.9-045.64

*Оригинальная статья / Original article***Нейросетевой подход в цифровом
фенотипировании снопового материала гороха:
от многоклассовой сегментации
к специализированным моделям уточнения****И. И. Габитов¹, Ф. Р. Сафин¹✉, А. А. Катков¹,
А. М. Дмитриев¹, А. С. Казьмирук¹, А. А. Кашапов²**¹*Башкирский государственный аграрный университет,
г. Уфа, Российская Федерация, <https://ror.org/02ybewg31>*²*ООО «Титаниум Диджитал»,
г. Уфа, Российская Федерация*✉ fls02@mail.ru*Аннотация*

Введение. Цифровое фенотипирование сухого снопового материала гороха необходимо для ускорения селекционных работ в растениеводстве. Автоматический анализ таких образцов осложняется перекрытием органов, их низкой контрастностью, близкой окраской и экстремальным дисбалансом пикселей между морфологическими классами. Для решения проблемы предлагается каскадный нейросетевой подход, сочетающий многоклассовую семантическую сегментацию на кропах с последующим уточнением специализированной бинарной моделью слабопредставленного класса.

Цель исследования. Разработка нейросетевого подхода для цифрового фенотипирования снопового материала гороха, основанного на последовательном применении семантической многоклассовой сегментации и специализированной бинарной модели уточнения для слабопредставленных морфологических органов.

Материалы и методы. Исходный набор данных включал 162 изображения семи сортов гороха с ручной разметкой пяти классов (органов): фон, стебель, прилистник, боб и корень. Базовая U-Net архитектура с энкодером ResNet-34 обучалась на цельных изображениях и кропах размером 512x512 пикселей с использованием комбинированной функции потерь. Для корня дополнительно сформирована бинарная root-only модель с соответствующей функцией потерь и параметром pos_weight = 50, увеличивающим штраф за ошибки на положительном классе.

Результаты исследования. Качество нейросетевой семантической многоклассовой сегментации в значительной степени определяется не только архитектурой модели, но и способом подготовки данных. При сохранении архитектуры U-Net переход от цельных изображений к кропам повысил средний IoU распознавания классов

© Габитов И.И., Сафин Ф.Р., Катков А.А., Дмитриев А.М., Казьмирук А.С., Кашапов А.А., 2026

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

с 42,89 до 92,01 %. В то же время IoU миноритарного класса Root остался на уровне 30,63 %. Специализированная root-only модель показала рост Root IoU по классу Root до 88,46 %. Это подтверждает, что для слабо представленных и визуально сложных органов растения на изображениях целесообразно применять специализированную модель уточнения.

Заключение. Увеличение числа эпох само по себе не устраняет влияние экстремального дисбаланса классов по пикселям. Наиболее результативным оказалось разделение общей и специализированной задач сегментации. Предложенный каскадный нейросетевой подход может быть использован как основа программного комплекса цифрового фенотипирования и адаптирован к другим культурам, для которых характерны малые, слабоконтрастные и редко представленные органы.

Ключевые слова: горох посевной, признаки морфологические, компьютерное зрение, цифровое фенотипирование, сегментация семантическая, сеть нейронная

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Габитов И.И., Сафин Ф.Р., Катков А.А., Дмитриев А.М., Казмирук А.С., Кашапов А.А. Нейросетевой подход в цифровом фенотипировании снопового материала гороха: от многоклассовой сегментации к специализированным моделям уточнения. *Инженерные технологии и системы*. 2026;36(3):518–540. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.26363.518-540>

A Neural Network Approach to Digital Phenotyping of Pea Sheaf Material: from Multi-Class Segmentation to Specialized Refinement Models

I. I. Gabitov^a, F. R. Safin^a✉, A. A. Katkov^a, A. M. Dmitriev^a,
A. S. Kazmiruk^a, A. A. Kashapov^b

^aBashkir State Agrarian University,
Ufa, Russian Federation, <https://ror.org/02y6ewg31>

^bLLC «Titanium Digital»,
Ufa, Russian Federation

✉ fils02@mail.ru

Abstract

Introduction. Digital phenotyping of dried pea sheaf material is essential for accelerating breeding work in plant-growing. Automatic analysis of such samples is complicated by overlapping organs, low contrast, similar coloration, and extreme pixel imbalance between morphological classes. To solve this problem, there has been proposed a cascade neural network approach combining multi-class semantic segmentation on crops with subsequent refinement of underrepresented classes using a specialized binary model.

Aim of the Study. The study is aimed at developing a neural network approach for digital phenotyping of pea sheaf material. This approach consists in the sequential application of semantic multi-class segmentation and a specialized binary refinement model for poorly represented morphological organs.

Materials and Methods. The original dataset included 162 images of seven pea varieties, manually labeled into five classes (organs): background, stem, stipule, pod, and root. The baseline U-Net architecture with the ResNet-34 encoder was trained through using full images and 512x512 pixel crops with the use of a combined loss function. For the root, there was formed a binary root-only model with an appropriate loss function and a pos_weight parameter of 50, increasing the penalty for errors in the positive class.

Results. The quality of neural network semantic multiclass segmentation is largely determined not only by the model architecture but also by the data preparation method. Maintaining the same U-Net architecture, the transition from whole images to cropped images increased the average class recognition IoU from 42.89 to 92.01%. Meanwhile, the IoU for the minority Root class remained at 30.63%. A specialized root-only model demonstrated an increase in Root IoU for the Root class to 88.46%. This confirms that a specialized refinement model is appropriate for poorly represented and visually complex plant organs in images.

Conclusion. The obtained data show that increasing the number of epochs alone does not eliminate the impact of extreme class imbalance across pixels. Separating the general and specialized segmentation tasks is the most effective. The proposed cascade neural network approach can be used as the basis for a digital phenotyping software suite and adapted to other crops characterized by small, low-contrast, and sparsely represented organs.

Keywords: pea, morphological features, computer vision, digital phenotyping, semantic segmentation, neural network

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

For citation: Gabitov I.I., Safin F.R., Katkov A.A., Dmitriev A.M., Kazmiruk A.S., Kashapov A.A. A Neural Network Approach to Digital Phenotyping of Pea Sheaf Material: from Multi-Class Segmentation to Specialized Refinement Models. *Engineering Technologies and Systems*. 2026;36(3):518–540. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.26363.518-540>

ВВЕДЕНИЕ

Цифровое фенотипирование растений является ключевым направлением развития современной аграрной науки, поскольку скорость получения генотипической и фенотипической информации существенно выше возможностей традиционных методов определения. Его связывают с использованием оптических сенсоров, автоматизированных платформ, компьютерного зрения и машинного обучения [1–3].

Горох посевной (*Pisum sativum* L.) – важная продовольственная и кормовая культура, играющая заметную роль в биологической фиксации азота. В селекции гороха ключевыми являются объективные оценки морфологических и продуктивных признаков, на основе которых ведется отбор перспективных образцов [4; 5]. Традиционный ручной учет (измерение длины стебля и корня, подсчет бобов и др.) требует значительных временных затрат и носит субъективный характер. Внедрение нейросетевых методов открывает путь к быстрому, воспроизводимому и точному цифровому фенотипированию.

Ранее предложенные алгоритмы компьютерного зрения подтвердили возможность автоматизации анализа гороха, но не обеспечили устойчивого выделения всех органов, прежде всего корня [6]. Особенно сложной является автоматизация анализа снопового материала. В отличие от живых растений, снимаемых в поле или в климатической камере, сухой сноп представляет собой деформированный объект, в котором органы растения частично перекрывают друг друга и имеют близкую окраску. При этом один образец должен рассматриваться как единая фенотипическая система: выделение только растения в целом не позволяет измерить длину отдельных органов, оценить их взаимное расположение и подготовить данные для автоматизированного морфометрического учета.

Цель исследования – разработка каскадного нейросетевого подхода, сочетающего многоклассовую семантическую сегментацию на кропах с последующим уточнением миноритарного класса специализированной бинарной моделью. Для достижения этой цели необходимо решить задачу по преодолению фундаментальной проблемы экстремального дисбаланса классов, характерную для сухих растений и не имеющую прямых аналогов в известных исследованиях по фенотипированию сноповых культур.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Уровень развития цифрового фенотипирования рассматривается как ограничивающий фактор в повышении эффективности селекционных работ и биологических исследований [7–9]. Особое значение в цифровом фенотипировании имеет семантическая сегментация, которая позволяет каждый пиксель изображения отнести к определенному классу. Современные обзоры показывают ее применимость для распознавания культур, диагностики болезней, оценки листовой поверхности и продуктивности [10–12]. Однако большинство решений ориентировано на анализ сельскохозяйственных посевов и семенного материала по различным признакам [13; 14]. Так, даже при наличии развитых нейросетевых платформ существенными источниками ошибок остаются перекрытие органов растений, неоднородность съемки и ограниченность разметки [15–17].

Обзоры по сегментации растений систематизируют encoder-decoder-сети (кодировщик-декодировщик-сети), механизмы внимания, трансформеры и instance segmentation (сегментация экземпляров), одновременно отмечая зависимость качества распознавания классов от разметки, условий съемки и изменчивости морфологии [9; 10]. Платформа Deep Plant Phenomics и проведенные эксперименты зарубежных ученых показали высокую эффективность глубокого обучения для анализа побегов и корней, но преимущественно по контролируемым сценариям [17; 18].

Исследования отдельных органов подтверждают преимущества специализации. Оптические методы позволяют оценивать форму, размеры и свойства семян [13]. Система для кукурузных початков автоматизирует выделение и количественную оценку зерен [14]. Eff-UNet++ решает сегментацию и подсчет листьев [19]. Детально размеченные датасеты и сравнительное исследование разделения листьев способствовали объективному сопоставлению алгоритмов, однако выявлены устойчивые трудности при соприкосновении объектов и их перекрытии [15; 16].

Отечественные публикации демонстрируют практическую зрелость направления: разработана onboard-система детекции фитопатологий [11], семантическая сегментация поражений пшеницы [12], нейросетевая оценка содержания хлорофилла [20], облачный сервис выявления проблемных участков полей [21] и методы генерации синтетических данных для сегментации азотного режима [22]. Предшествующая работа по гороху [6] сформировала алгоритмическую основу цифрового фенотипирования, но задача надежного выделения корня в составе сухого снопа осталась нерешенной.

Наиболее близки к фенотипированию сухих снопов методы фенотипирования корневой системы. RootNav 2.0 автоматически восстанавливает архитектуру

корней [23], а RootPainter сокращает объем разметки за счет корректирующего обучения [24]. При этом числовое сопоставление методов RootNav 2.0 и RootPainter невозможно без общих датасетов и единого протокола оценки. Обзоры также подчеркивают сложность топологии корней и получения эталонных данных [25; 26]. Однако такие методы обычно анализируют корень отдельно.

Автоматическая идентификация гербарных образцов подтверждает применимость глубоких сетей к сухому материалу, но относится к классификации изображения целиком [27]. Для гороха этого недостаточно, так как селекционная ценность культуры и вариабельность ее признаков требуют определения и измерения отдельных органов [4; 5].

Методическая основа статьи соответствует современным представлениям о сегментации. U-Net обеспечивает точную локализацию при ограниченном объеме данных [28], а остаточная архитектура ResNet эффективна как предварительно обученный энкодер [29]. Общие методы компенсации дисбаланса и функции потерь семейства Dice повышают чувствительность к редким областям [30; 31], но не гарантируют точного распознавания класса, который одновременно мал, тонок и визуально сходен с посторонними элементами.

Сравнение публикаций показывает, что одной из практически значимых и одновременно методически сложных задач является цифровое фенотипирование снопового материала – целых растений, отобранных и высушенных для последующего учета. Научная проблема определяется сочетанием трех факторов: экстремального пиксельного дисбаланса, низкой контрастности органов растения и их перекрытия.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования

В качестве объекта исследования принят сноповой материал гороха. Исходный набор данных (датасет) включал 162 изображения с размеченными вручную масками гороха. В датасет вошли изображения семи сортов: Aksakskiy usatiy, Kaban, Vizger, Alla, Gambit, Yaguar и Yuldash.

Методы, оборудование и процедура исследования

Разрабатываемая модель решала задачу распределения каждого пикселя изображения по классам: фон, стебель, прилистник, боб и корень. Изображения получали в сопоставимых лабораторных условиях. Растения размещали на светлом масштабном фоне с видимой размеченной заранее сеткой, что позволяло сохранять пространственную привязку для последующей морфометрии. В набор включали изображения с различными органами растения, достаточной четкостью и видимым масштабным ориентиром. Из анализа исключали снимки с критическим «смазом», отсутствием значимой части образца или с такими тенями и перекрытиями, при которых ручная идентификация органов становилась неоднозначной.

Ручная разметка выполнялась одним подготовленным человеком по единому протоколу с последующей визуальной проверкой цветных контрольных масок. Для снижения субъективности использовались: фиксированный порядок наложения классов, единое цветовое кодирование, проверка соответствия индексированных

масок цветным маскам визуального контроля. При этом необходимость в межэкспертной согласованности отсутствовала.

При создании масок стебель наносился первым и располагался в нижнем слое. Поверх него наносились корень, прилистники и бобы. Такая последовательность выбрана из-за вероятности перекрытия крупной маской стебля остальных органов горха.

Маски изображений формировались в двух вариантах: индексированная `masks_id` для обучения и цветная `masks_color` для визуальной проверки. Цвета выделяемых классов приведены к единому стандарту (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

T a b l e 1

Классы и цветовое кодирование их масок
Classes and color coding of their masks

ID (номер класса) / ID (class number)	Название класса / Class name	RGB (цветовое кодирование) / RGB (color coding)
0	Фон / Background	–
1	Стебель / Stem	255, 96, 55 (красно-оранжевый / red-orange)
2	Прилистник / Stipule	250, 50, 83 (неоновый розово-красный / neon pink-red)
3	Боб / Pod	45, 1, 255 (ультрамариновый ярко-синий / ultramarine bright blue)
4	Корень / Root	61, 61, 245 (глубокий ярко-синий / deep bright blue)

Источник: таблицы 1–2 составлены авторами статьи.

Source: The tables 1–2 were compiled by the authors of the article.

Обучение модели выполнялось с использованием нейронной сети U-Net типа encoder-decoder (кодировщик-декодировщик), широко применяемой для решения задач по семантической сегментации изображений. Она позволяет не только определить объект на изображении, но и выделить его контур на уровне отдельных пикселей (каждому пикселю изображения присваивается соответствующий класс). Качество многоклассовой сегментации оценивалось по IoU (метрика пересечения к объединению, показывающая степень совпадения предсказанной и эталонной областей) без учета фона и по IoU каждого целевого класса.

В качестве энкодера использовалась сеть ResNet-34, рассматриваемая как часть модели и позволяющая извлекать из изображения соответствующие признаки (границы, текстуру, форму и другие визуальные особенности). Применение ResNet-34, предварительно обученной на наборе изображений ImageNet, позволило использовать уже сформированные низкоуровневые признаки на изображениях и благодаря этому ускорить обучение модели на малом количестве специализированных данных.

Комбинация U-Net + ResNet-34 выбрана как воспроизводимая и хорошо изученная базовая схема для задач семантической сегментации при ограниченном объеме размеченных данных, где важны точная локализация контуров и возможность использования признаков, предварительно сформированных на ImageNet. Более современные архитектуры, включая DeepLabV3+, SegFormer и трансформерные модели компьютерного зрения, в данном исследовании не тестировались,

поскольку их сравнение потребовало бы отдельного исследования с настройкой гиперпараметров, несколькими запусками и единым протоколом статистической оценки. Поэтому полученные выводы следует трактовать не как доказательство оптимальности U-Net + ResNet-34 среди всех возможных архитектур, а как подтверждение эффективности предложенной каскадной стратегии при выбранной базовой модели.

При обучении модели использовалась комбинированная функция потерь (математическая мера ошибки нейронной сети, которую оптимизатор минимизирует при обучении), включающая функции Dice Loss и Cross Entropy Loss. Dice Loss оценивает совпадение предсказанной маски с эталонной и полезна при решении задач сегментации, где важна форма выделяемой области. Cross Entropy Loss оценивает правильность классификации каждого отдельного пикселя по классам (была включена в состав функции потерь для повышения устойчивости обучения модели и дополнительного контроля классификации по пикселям).

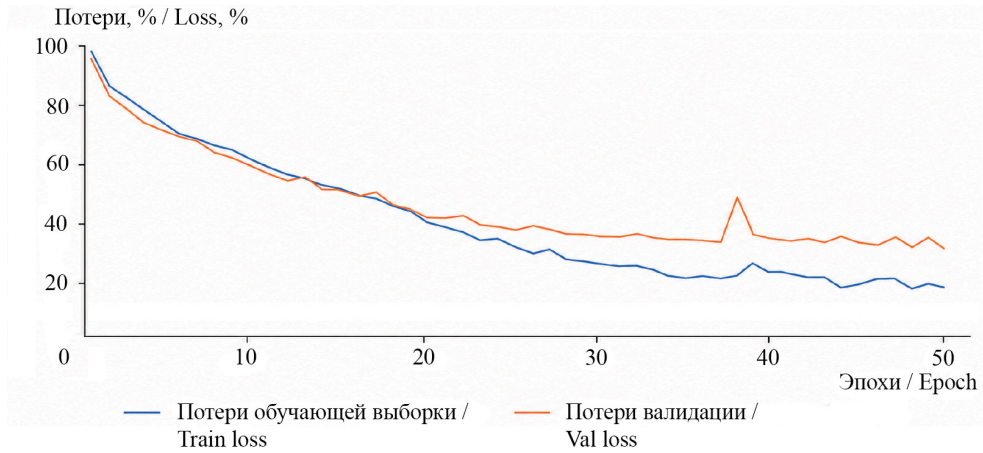
Использовалась комбинация $0,7 \cdot \text{Dice Loss} + 0,3 \cdot \text{Cross Entropy Loss}$. Большой удельный вес функция Dice Loss имела в связи с необходимостью получения правильной области органов растения.

Оптимизация параметров модели выполнялась с использованием алгоритма AdamW, который позволяет постепенно изменять вес классов так, чтобы уменьшить ошибку предсказаний. Начальная скорость обучения, определяемая параметром weight decay (является безразмерным и определяет величину изменения весов класса на каждом шаге оптимизации), составляла $1e-4$ (т. е. 0,0001). Такая скорость выбрана для более стабильного изменения параметров модели. Использование параметра weight decay позволило дополнительно снизить риск переобучения. Наряду с этим применялся и планировщик ReduceLROnPlateau, уменьшающий скорость обучения, если качество распознавания на проверочной выборке перестает улучшаться.

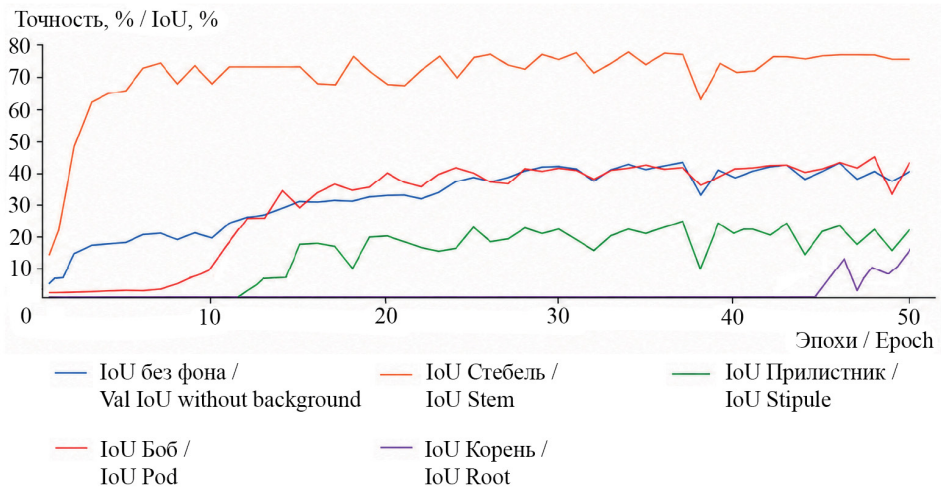
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На первом этапе исследования модель обучалась на цельных изображениях. Разделение на обучающую (Train) и валидационную (Val) выборку цельных изображений выполнили в соотношении 80/20 (130 изображений в Train и 32 изображения в Val) с формированием датасета `pea_dataset_unified`. При формировании обучающей и валидационной выборок учитывался сортовой состав исходного набора данных, чтобы изображения семи сортов были представлены в обеих частях выборки. Выполнили 50 эпох (полных обучающих циклов) с определением величины IoU (рис. 1).

В связи с тем, что фон и стебель занимали большую часть изображения, модель быстро обучалась выделять именно стебель, тогда как бобы, прилистники и корень оставались плохо распознаваемыми. На лучшей 33 эпохе короткого прогона на цельных изображениях средний IoU (без учета фона) составил 39,63 %. При этом по стеблю IoU был равен 76,32 %, прилистникам – 19,63 %, бобам – 38,64 %, корню – 0 %.



a)



b)

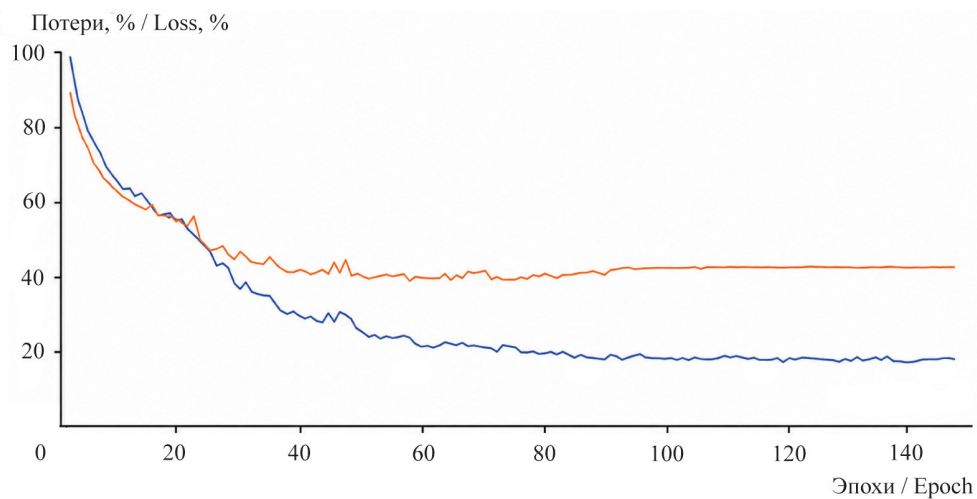
Р и с. 1. Динамика обучения модели на цельных изображениях (50 эпох): а) потери; б) точность

Fig. 1. Dynamics of model training on whole images (50 epoch): a) loss; b) IoU

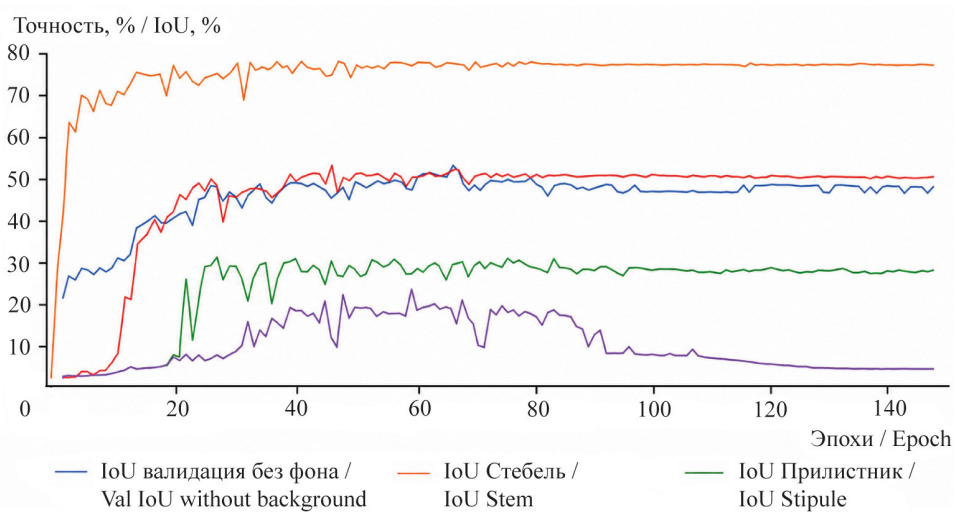
Источник: рисунки 1, 2, 4, 6 составлены авторами статьи в программной среде Python с использованием библиотеки Matplotlib по результатам обучения нейронной сети.

Source: Figures 1, 2, 4, 6 were compiled by the authors of the article in the Python software environment using the Matplotlib library based on the results of neural network training.

Из-за низкой точности распознавания органов гороха количество эпох было увеличено до 150. Динамика обучения модели показана на рисунке 2, а пример улучшения предсказаний по органам гороха на рисунке 3.

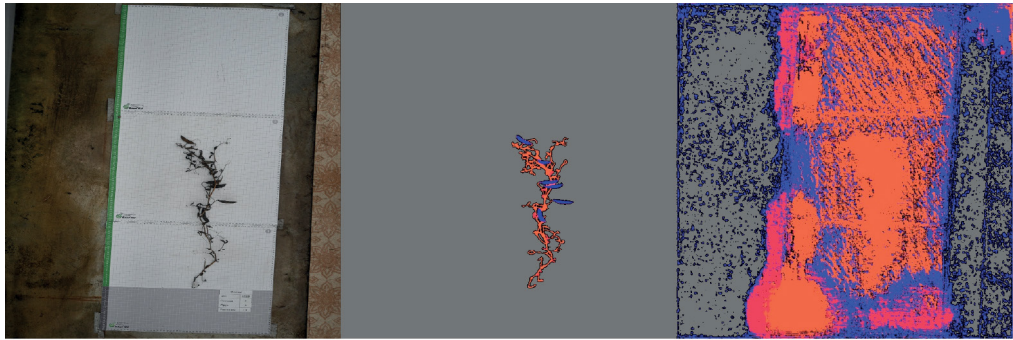


a)

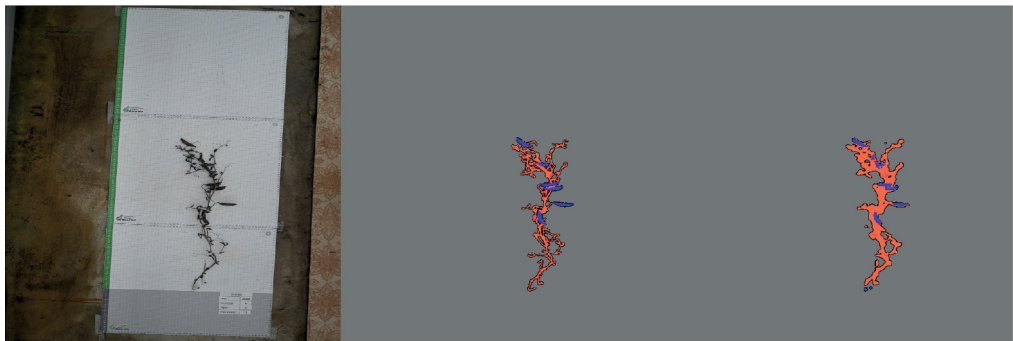


b)

Р и с. 2. Динамика обучения модели на цельных изображениях (150 эпох): а) потери; б) точность
 Fig. 2. Dynamics of model training with whole images (150 epoch): a) loss; b) IoU



a)



b)

Р и с. 3. Визуализация результатов обучения модели на целых изображениях (исходное изображение; маска, полученная разметкой вручную; маска, полученная обученной моделью): а) на начальном этапе; б) по результатам обучения на 150 эпохах

F i g. 3. Visualization of the results of model training with whole images (original image; mask obtained by manual labeling; mask obtained by the trained model): a) at the initial stage; b) based on the results of training with 150 epochs

Источник: рисунки 3, 5, 7 составлены авторами статьи в программной среде Python с использованием библиотек PyTorch, NumPy, OpenCV по результатам обучения нейронной сети.

Source: Figures 3, 5, 7 were compiled by the authors of the article in the Python software environment using the PyTorch, NumPy, and OpenCV libraries based on the results of neural network training.

Увеличение обучающих циклов до 150 повысило общий IoU. На лучшей 66 эпохе средний IoU (без учета фона) достиг 42,89 %, однако результат по корню остался низким (8,64 %). После этой эпохи началось переобучение модели.

Сложность в распределении пикселей по классам заключалась в сильном дисбалансе количества этих пикселей, относящихся к определенному классу. Это привело к низкой обучаемости модели по выделению мелких и редко встречающихся органов (миноритарных классов).

Низкая точность распознавания миноритарного класса Root связана с совокупностью факторов: занимает крайне малую долю пикселей и имеет тонкую форму; зачастую его контрастность близка к фону и визуально он может быть похож на тени, растительные остатки или тонкие фрагменты органов гороха.

В связи с относительно низкой точностью распознавания мелких органов исходные цельные изображения были разбиты на кропы (фрагмент исходного изображения фиксированного размера, используемый как отдельный обучающий пример) с формированием датасета `pea_dataset_crops`. Это позволило увеличить долю мелких органов гороха на кропах.

Размер кропа был выбран 512x512 пикселей. Из 162 исходных изображений было получено 13 726 кропов (разбивка осуществлялась со смещением на 384 пикселя, т. е. возникало перекрытие в 25 %). Такие размеры кропа и шаг смещения выбраны как компромисс между сохранением локального морфологического контекста и вычислительной нагрузкой. Перекрытие в 25 % уменьшало вероятность потери органа на границе кропов. В выборках Train использовалось 10 981 кроп, а Val – 745.

С учетом дисбаланса данных по классам их веса были выбраны эвристически. Для Cross Entropy Loss использовались веса классов [0,2; 1,5; 1,2; 1,4; 3,0], соответствующих (в последовательности) классам: фон, стебель, прилистник, боб и корень. Вес фона был уменьшен до 0,2, так как он занимал большую часть изображения и при равном весе с остальными классами мог доминировать в процессе обучения. Вес корня был увеличен до 3,0, поскольку он является наиболее редким и трудно выделяемым миноритарным классом. Для стебля, прилистников и бобов вес также был увеличен, так как они уступали фону по числу пикселей.

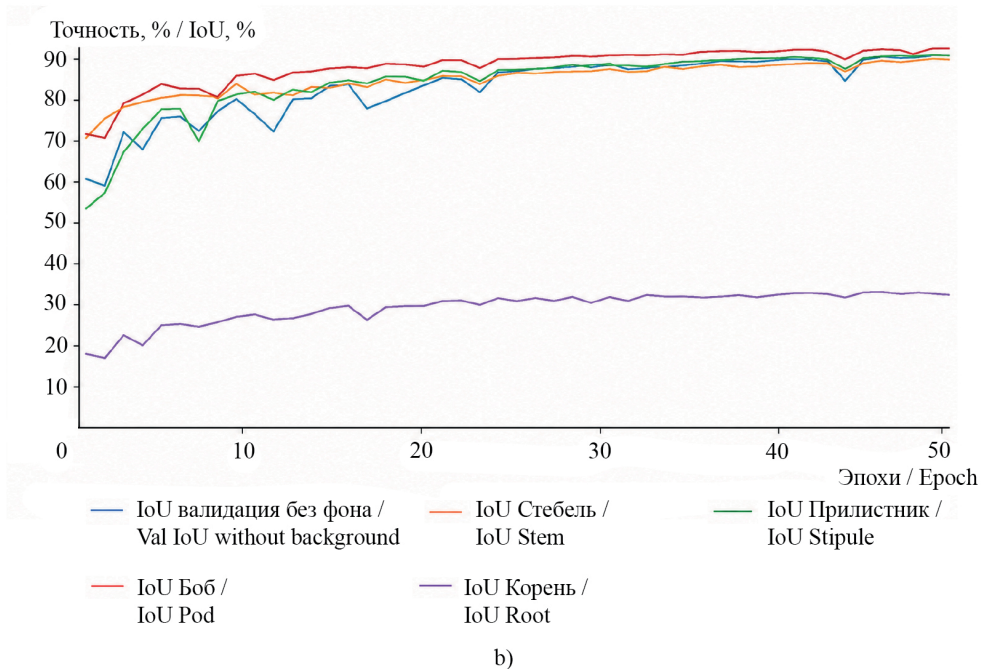
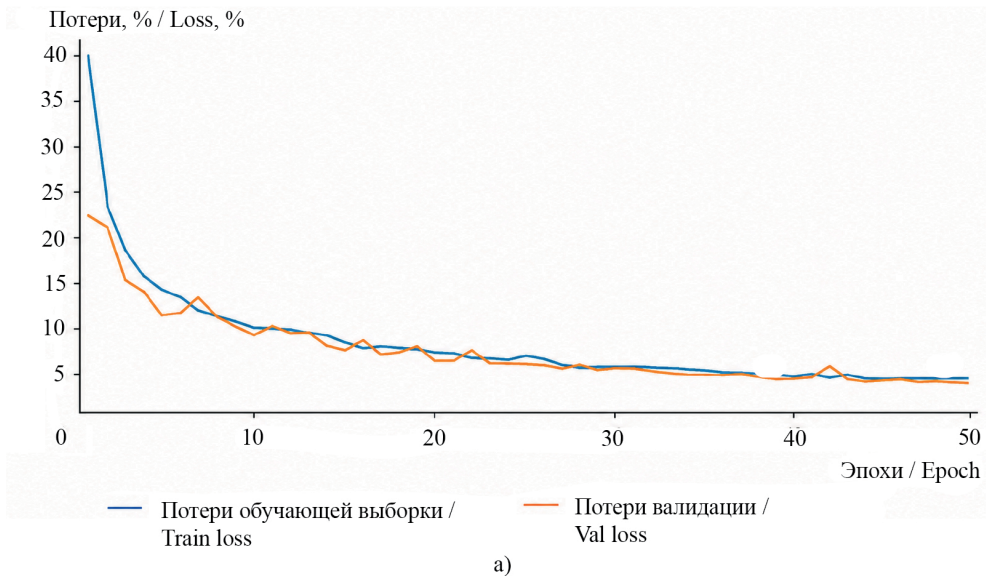
Результаты исследований представлены на рисунках 4 и 5.

Лучший результат по обучению модели на кропах получен на 50-й эпохе. Средняя точность IoU по классам (без учета фона) составила 92,01 %. По отдельным классам: Stem – 90,38 %, Stipule – 92,21 %, Pod – 93,90 %, Root – 30,63 %. По полученным результатам выявлено, что такие органы гороха, как стебель, прилистники и бобы определялись с высокой точностью, однако по корню результаты остались также на низком уровне.

В связи с относительно низкой точностью распознавания миноритарного класса Root был сформирован отдельный бинарный датасет `pea_dataset_root_crops`. В обучении использовалось 1 736 кропа (708 с наличием корня и 1 028 без него). В выборках Train использовалось 1 389 кропа, а в Val – 347.

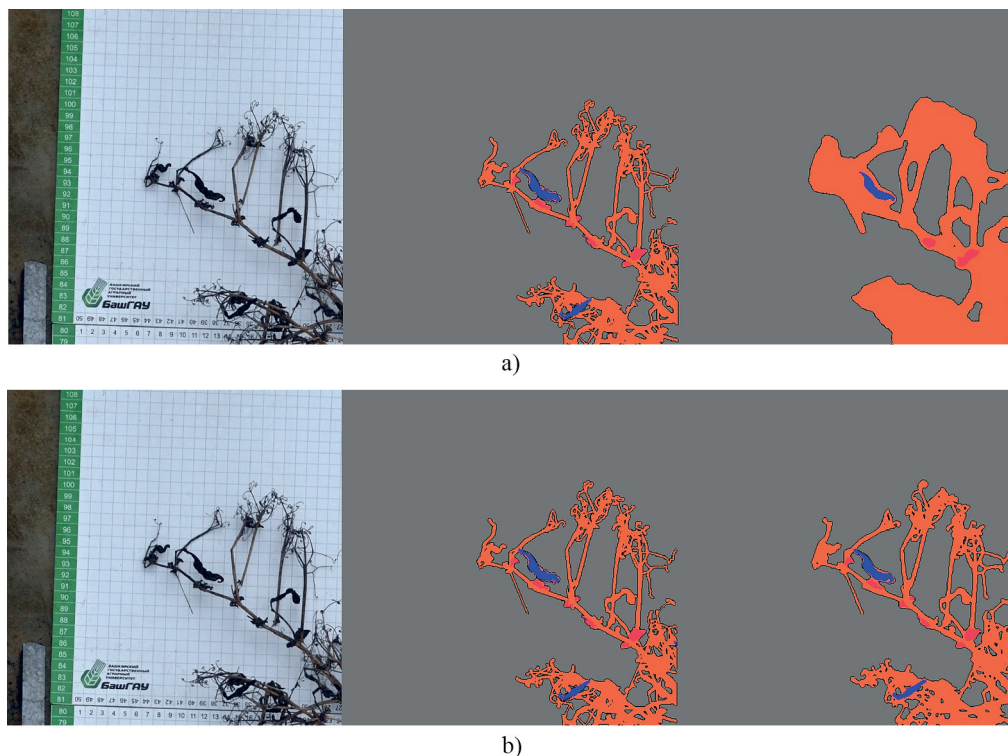
Специальная бинарная модель `root-only` обучалась на двух классах: Root (класс 1) и Background/Not_Root (класс 0). Класс Background/Not_Root объединял фон, стебель, прилистники и бобы, а Root включал отдельно только корень. Это позволило модели сосредоточиться на поиске только класса Root. При этом выходной слой был изменен, и модель выдавала одну карту вероятности, показывающую, насколько каждый пиксель похож на корень.

В обучении использовалась бинарная функция потерь $0,55 \cdot \text{Dice Loss} + 0,45 \cdot \text{BCEWithLogitsLoss}$. Dice Loss отвечала за совпадение формы выделенной области корня с эталонной маской, а BCEWithLogitsLoss оценивала правильность бинарной классификации пикселей на два класса (корень и не корень).



Р и с. 4. Динамика обучения модели на кропах (50 эпох): а) потери; б) точность

F i g. 4. Dynamics of model training with crops (50 epoch): a) loss; b) IoU



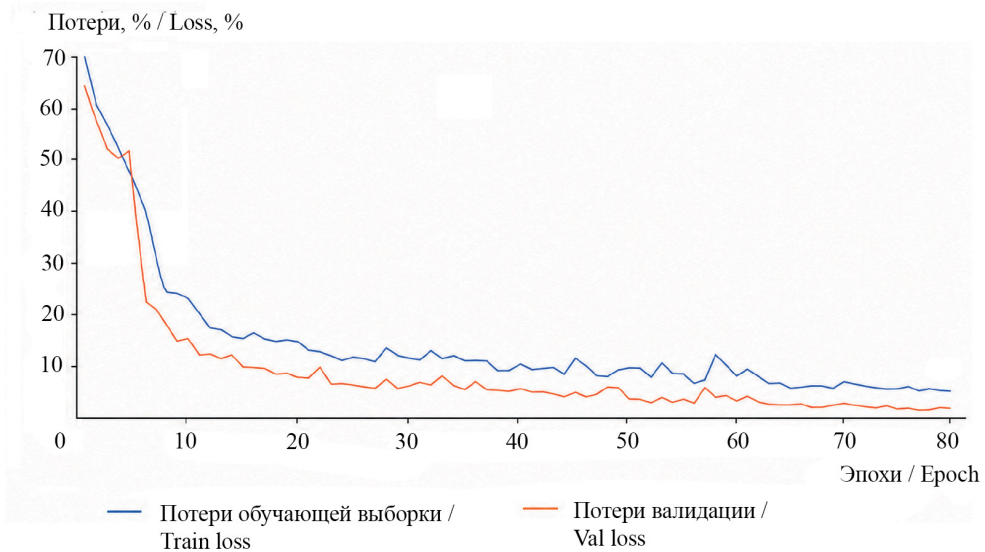
Р и с. 5. Визуализация результатов обучения модели на кропах (исходное изображение; маска, полученная разметкой вручную; маска, полученная обученной моделью): а) на начальном этапе; б) по результатам обучения на 50 эпохах

F i g. 5. Visualization of the results of model training with crops (original image; mask obtained by manual marking; mask obtained by the trained model): а) at the initial stage; б) based on the results of training on 50 epochs

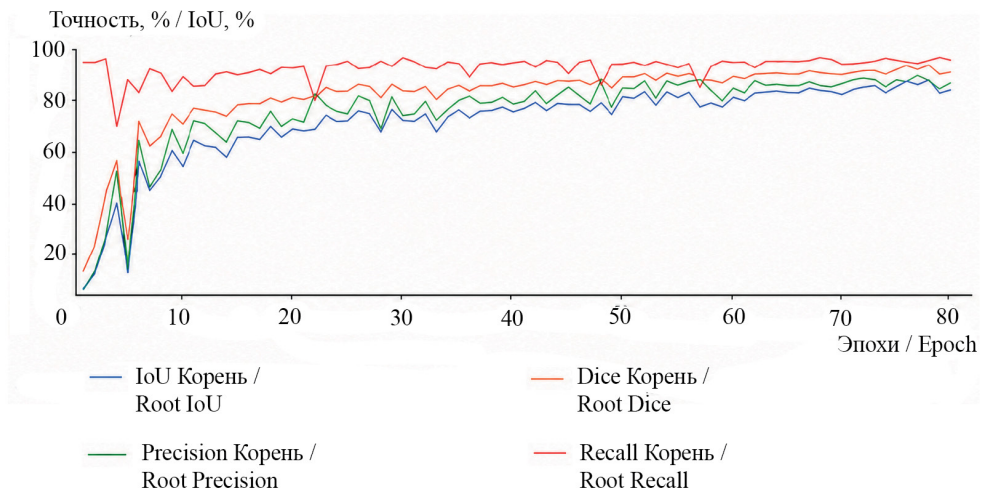
Для компенсации малого количества пикселей корня был использован параметр $\text{pos_weight} = 50$. Он увеличивал штраф за ошибки на положительном классе (на пикселях корня). Это было необходимо в связи с тем, что даже после отбора root-only кропов доля пикселей корня на изображениях составляла не более 0,4 %. Без усиления положительного класса модель могла бы получить низкую точность распознавания (почти всегда относя пиксели к классу Background/Not_Root) и плохо находить сам корень.

Для root-only модели дополнительно рассчитывались Dice (метрика сходства масок, близкая по смыслу к IoU, но обычно принимающая более высокие значения), Precision (доля правильных пикселей среди всех пикселей, предсказанных как нужный класс) и Recall (доля найденных пикселей среди всех пикселей эталонного класса). Высокий Recall при низком Precision означает, что модель почти не пропускает корень, но ошибочно относит к нему лишние пиксели. Высокий Precision при низком Recall означает осторожную модель, которая редко ошибается, но пропускает часть корня.

Результаты обучения специализированной бинарной модели представлены на рисунках 6 и 7.



a)



b)

Р и с. 6. Динамика обучения специализированной root-only модели (80 эпох):

а) потери; б) точность

Fig. 6. Dynamics of training a specialized root-only model (80 epoch): a) loss; b) IoU



а)



б)

Р и с. 7. Визуализация результатов обучения root-only модели на кропах без наличия корня на изображении (исходное изображение; маска, полученная разметкой вручную; маска, полученная обученной моделью): а) на начальном этапе; б) по результатам обучения на 80 эпохах

F i g. 7. Visualization of the results of training a root-only model with crops without the presence of a root in the image (original image; mask obtained by manual labeling; mask obtained by the trained model): а) at the initial stage; б) based on the results of training with 80 epochs

По рисунку 7 видно, что на начальных этапах обучения модель ошибочно определяла класс Root, путая его с другими органами гороха. В процессе обучения точность определения корня возросла и ошибочное определение уменьшилось.

Root-only модель достигла лучшего результата к 78-й эпохе: Root IoU – 88,46 %, Dice – 93,85 %, Precision – 88,26 %, Recall – 95,50 %. Из них видно, что обученная модель смогла найти около 95,50 % пикселей, относящихся к классу корня, и при этом 88,26 % пикселей, предсказанных как корень, действительно относились к этому классу.

ОБСУЖДЕНИЕ

Проводимые экспериментальные исследования выполнялись при фиксированном разбиении данных и протоколе обучения (сравниваемые этапы выполнялись на одном наборе данных, при одной базовой архитектуре и единой логике оценки). Многократные независимые запуски модели с разными начальными условиями не проводились, стандартные отклонения метрик не определялись. Это ограничило статистическую оценку воспроизводимости абсолютных значений IoU, однако не

поменяло методический вывод о необходимости выделения корня в отдельную бинарную задачу. Обобщенные итоговые результаты экспериментальных исследований представлены в таблице 2.

Таблица 2

Table 2

Результаты обучения моделей по экспериментам

Results of training models based on experiments

Эксперимент / Experiment	Лучшая эпоха при обучении / The best epoch in learning	Валида- ционная точность IoU, % / Val IoU, %	Класс / Class			
			Стебель, % / Stem, %	Прилистник, % / Stipule, %	Боб, % / Pod, %	Корень, % / Root, %
на цельных изображениях / 50 эпох / 50 epoch	33	39,63	76,32	19,63	38,64	0,00
with whole images / 150 эпох / 150 epoch	66	42,89	76,92	19,29	41,91	8,64
на кропах (50 эпох) / on crops (50 epoch)	50	92,01	90,38	92,21	93,90	30,63
на root-only модели (80 эпох) / with root-only models (80 epoch)	78	88,46	—	—	—	88,46

Полученные результаты показывают, что качество нейросетевой семантической многоклассовой сегментации в значительной степени определяется не только архитектурой модели, но и способом подготовки данных. При сохранении той же архитектуры U-Net переход от цельных изображений к кропам повысил средний IoU (без учета фона) с 42,89 до 92,01 %. Особенно заметен рост точности определения по бобам и прилистникам. В то же время корень остался «слабым» классом, что связано не только с его малой представленностью на изображении, но и с низкой визуальной выраженностью.

Специализированная root-only модель показала, что выделение проблемного класса в отдельную бинарную задачу может быть эффективнее, чем дальнейшее увеличение числа эпох обучения. Подобный подход особенно полезен в случаях, когда один из классов имеет резкий дисбаланс с другими классами, сложную форму и высокую вероятность схожести с другими органами.

Показательным является сравнение результатов сегментации по миноритарному классу Root. В общей модели на кропах IoU класса Root составил 30,63 %, тогда как в специализированной бинарной модели Root IoU достиг 88,46 % (прирост составил 57,83 %). Это подтверждает, что для слабо представленных и визуально сложных органов растения на изображениях целесообразно применять специализированную модель уточнения.

Предложенный подход рассматривается как сегментационный модуль программного комплекса цифрового фенотипирования, а не как полностью завершенная система селекционного учета. Практическое применение этих признаков в селекционном процессе требует отдельной проверки точности автоматических измерений по ручным эталонам.

Отдельно следует отметить ограниченную возможность семантической сегментации для задач подсчета отдельных объектов. Модель выделяет класс пикселей, но не различает отдельные экземпляры. К примеру, если два боба соприкасаются и формируют одну непрерывную область на маске, то постобработка по компонентам может посчитать их как один объект. Для предварительной оценки качества подсчета можно использовать число связанных компонент, среднюю абсолютную ошибку подсчета объектов (MAE), относительную ошибку подсчета (MAPE), а также Precision, Recall и F1-score для объектов при сопоставлении автоматических и ручных экземпляров по порогу перекрытия IoU. Для гарантированного подсчета отдельных экземпляров в дальнейшем целесообразно рассмотреть instance segmentation, например, Mask R-CNN или YOLO-seg.

В рамках выполненной работы предложен и экспериментально апробирован нейросетевой подход для цифрового фенотипирования сухого снопового материала на примере гороха. В отличие от существующих решений, фокусирующихся на живых растениях или отдельных их органах, предлагаемый подход впервые реализует каскадный переход от многоклассовой сегментации к специализированной бинарной модели уточнения, что позволяет преодолеть характерное для сухих снопов сочетание пиксельного дисбаланса и низкой визуальной контрастности миноритарных органов.

Показано, что применение семантической многоклассовой сегментации на цельных изображениях снопового материала принципиально неспособно обеспечить полноценное фенотипирование: даже при 150 эпохах IoU класса Root не превысила 8,64 %, что обусловлено пиксельным дисбалансом и визуальной неразличимостью этого класса.

Разбивка изображений на кропы с эвристическим взвешиванием функции потерь является эффективной стратегией для многоклассовой сегментации основных органов гороха. Такой подход позволил получить средний IoU 92,01 % и достичь высокой точности по стеблю, прилистникам и бобам (IoU 90,38...93,90 %), однако, не решив проблему для корня (IoU 30,63 %).

Предложенный каскадный переход от многоклассовой модели к специализированной бинарной root-only модели уточнения является ключевым элементом подхода. Благодаря выделению корня в отдельную задачу определения на изображении и применению агрессивной компенсации дисбаланса ($\text{pos_weight} = 50$) удалось повысить точность сегментации класса Root до IoU 88,46 % при Recall 95,50 %, что практически применимо для количественной оценки в селекционном процессе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комбинирование многоклассовой и бинарной моделей формирует единую детальную фенотипическую маску целого растения, пригодную для автоматического извлечения морфометрических признаков. Предложенный каскадный подход, включающий послойную разметку органов, обучение на кропах и специализированное уточнение, может рассматриваться как универсальная методология цифрового фенотипирования снопового материала культур с аналогичными проблемами дисбаланса и низкой контрастности.

Из результирующих масок планируется извлекать: длину стебля и корня после скелетизации и пересчета пикселей в физические единицы по масштабному ориентиру; площадь и периметр отдельных органов; число и суммарную площадь бобов; относительные показатели распределения органов в структуре растения. Эти признаки представляют интерес для последующего селекционного учета, однако их точность должна быть подтверждена сравнением с ручными измерениями с расчетом MAE, RMSE, коэффициентов корреляции и относительной ошибки.

Дальнейшее развитие работы предполагает объединение этапов в единый программный комплекс и переход к методам *instance segmentation* для прямого подсчета отдельных органов гороха, что позволит расширить возможности цифрового фенотипирования снопового материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Li L., Zhang Q., Huang D. A Review of Imaging Techniques for Plant Phenotyping. *Sensors*. 2014;14(11):20078–20111. <https://doi.org/10.3390/s141120078>
2. Zhao C., Zhang Y., Du J., Guo X., Wen W., Gu S., et al. Crop Phenomics: Current Status and Perspectives. *Frontiers in Plant Science*. 2019;(10):714. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00714>
3. Шашко А.Ю., Бондаренко В.Ю., Черныш М.А., Пржевальская Д.А., Уснич С.Л., Пшибытко Н.Л. и др. Современные феномные платформы и их применение в биологии растений и сельском хозяйстве. *Журнал Белорусского государственного университета. Биология*. 2020;(2):15–25. <https://doi.org/10.33581/2521-1722-2020-2-15-25>
4. Кузнецов И.Ю., Дмитриев А.М., Авсахов Ф.Ф., Алимгафаров Р.Р., Родионов Н.Ю. Адаптивный потенциал коллекционных сортообразцов гороха посевного: оценка пластичности и стабильности в условиях Республики Башкортостан. *Зернобобовые и крупяные культуры*. 2026;1(57):17–26. <https://doi.org/10.24412/2309-348X-2026-1-17-26>
5. Daba S.D., Morris C.F. Pea Proteins: Variation, Composition, Genetics, and Functional Properties. *Cereal Chemistry*. 2022;99(1):8–20. <https://doi.org/10.1002/cche.10439>
6. Габитов И.И., Сафин Ф.Р., Катков А.А., Шамукаев С.Б., Казымирук А.С. Разработка алгоритмов компьютерного зрения для цифрового фенотипирования гороха. *Вестник Башкирского государственного аграрного университета*. 2026;(1):109–113. <https://doi.org/10.31563/1684-7628-2026-77-1-109-113>
7. Furbank R.T., Tester M. Phenomics – Technologies to Relieve the Phenotyping Bottleneck. *Trends in Plant Science*. 2011;16(12):635–644. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2011.09.005>
8. Fiorani F., Schurr U. Future Scenarios for Plant Phenotyping. *Annual Review of Plant Biology*. 2013;(64):267–291. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050312-120137>
9. Luo Z., Yang W., Yuan Y., Gou R., Li X. Semantic Segmentation of Agricultural Images: A Survey. *Information Processing in Agriculture*. 2024;11(2):172–186. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2023.02.001>
10. Lei L., Yang Q., Yang L., Shen T., Wang R., Fu C. Deep Learning Implementation of Image Segmentation in Agricultural Applications: A Comprehensive Review. *Artificial Intelligence Review*. 2024;(57):149. <https://doi.org/10.1007/s10462-024-10775-6>
11. Мударисов С.Г., Мифтахов И.Р., Фархутдинов И.М., Шафеева Э.И. Разработка маломощной onboard-системы точечной детекции фитопатологий пшеницы с применением модифицированной YOLO-архитектуры. *Инженерные технологии и системы*. 2026;36(1):114–139. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.036.202601.114-139>
12. Ариничев И.В., Полянских С.В., Ариничева И.В. Семантическая сегментация ржавчин и пятнистостей пшеницы. *Компьютерная оптика*. 2023;47(1):118–125. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-1130>

13. Liu F., Yang R., Chen R., Guindo M.L., He Y., Zhou J., et al. Digital Techniques and Trends for Seed Phenotyping Using Optical Sensors. *Journal of Advanced Research*. 2024;(63):1–16. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2023.11.010>
14. Warman C., Sullivan C.M., Preece J., Buchanan M.E., Vejlupekova Z., Jaiswal P., et al. A Cost Effective Maize Ear Phenotyping Platform Enables Rapid Categorization and Quantification of Kernels. *The Plant Journal*. 2021;106(2):566–579. <https://doi.org/10.1111/tpj.15166>
15. Minervini M., Fischbach A., Schar H., Tsafaris S.A. Finely-Grained Annotated Datasets for Image-Based Plant Phenotyping. *Pattern Recognition Letters*. 2016;(81):80–89. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2015.10.013>
16. Schar H., Minervini M., French A.P., Klukas C., Kramer D.M., Liu X., et al. Leaf Segmentation in Plant Phenotyping: A Collation Study. *Machine Vision and Applications*. 2016;(27):585–606. <https://doi.org/10.1007/s00138-015-0737-3>
17. Ubbens J.R., Stavness I. Deep Plant Phenomics: A Deep Learning Platform for Complex Plant Phenotyping Tasks. *Frontiers in Plant Science*. 2017;(8):1190. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01190>
18. Pound M.P., Burgess A.J., Wilson M.H., Atkinson J.A., Griffiths M., Jackson A.S. Deep Machine Learning Provides State-of-the-Art Performance in Image-Based Plant Phenotyping. *GigaScience*. 2016. <https://doi.org/10.1101/053033>
19. Bhagat S., Kokare M., Haswani V., Hambarde P., Kamble R. Eff-UNet++: A Novel Architecture for Plant Leaf Segmentation and Counting. *Ecological Informatics*. 2022;(68):101583. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101583>
20. Ракутько С.А., Ракутько Е.Н., Су Ц. Оценка содержания хлорофилла по оптической плотности листьев растений с использованием машинного обучения. *Инженерные технологии и системы*. 2025;35(4):678–699. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202504.678-699>
21. Белоусов И.С., Рогачев А.Ф. Создание нейросетевого сервиса для выявления проблемных участков сельскохозяйственных полей. *Известия НВ АУК*. 2021;3(63):439–448. <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2021-03-45>
22. 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>
23. Yasrab R., Atkinson J.A., Wells D.M., French A.P., Pridmore T.P., Pound M.P. RootNav 2.0: Deep Learning for Automatic Navigation of Complex Plant Root Architectures. *GigaScience*. 2019;8(11):123. <https://doi.org/10.1093/gigascience/giz123>
24. Smith A.G., Han E., Petersen J., Olsen N.A.F., Giese C., Athmann M., et al. RootPainter: Deep Learning Segmentation of Biological Images With Corrective Annotation. *New Phytologist*. 2022;236(2):774–791. <https://doi.org/10.1111/nph.18387>
25. Atkinson J.A., Pound M.P., Bennett M.J., Wells D.M. Uncovering the Hidden Half of Plants Using New Advances in Root Phenotyping. *Current Opinion in Biotechnology*. 2018;(55):1–8. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2018.06.002>
26. Kuijken R.C.P., Eeuwijk F.A., Marcelis L.F.M., Bouwmeester H.J. Root Phenotyping: from Component Trait in the Lab to Breeding. *Journal of Experimental Botany*. 2015;66(18):5389–5401. <https://doi.org/10.1093/jxb/erv239>
27. Carranza-Rojas J., Goëau H., Bonnet P., Mata-Montero E., Joly A. Going Deeper in the Automated Identification of Herbarium Specimens. *BMC Evolutionary Biology*. 2017;(17):181. <https://doi.org/10.1186/s12862-017-1014-z>
28. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. In: *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015*. MICCAI 2015: Lecture Notes in Computer Science. Springer; Cham. 2015. pp. 234–241. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_28

29. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Deep Residual Learning for Image Recognition. In: 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Las Vegas: IEEE. 2016. pp. 770–778. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.90>
30. Buda M., Maki A., Mazurowski M.A. A Systematic Study of the Class Imbalance Problem in Convolutional Neural Networks. *Neural Networks*. 2018;(106):249–259. <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2018.07.011>
31. Sudre C.H., Li W., Vercauteren T., Ourselin S., Cardoso M.J. Generalised Dice overlap as a Deep Learning Loss Function for Highly Unbalanced Segmentations. In: Deep Learning in Medical Image Analysis and Multimodal Learning for Clinical Decision Support. Lecture Notes in Computer Science. 2017. pp. 240–248. https://doi.org/10.1007/978-3-319-67558-9_28

REFERENCES

1. Li L., Zhang Q., Huang D. A Review of Imaging Techniques for Plant Phenotyping. *Sensors*. 2014;14(11):20078–20111. <https://doi.org/10.3390/s141120078>
2. Zhao C., Zhang Y., Du J., Guo X., Wen W., Gu S., et al. Crop Phenomics: Current Status and Perspectives. *Frontiers in Plant Science*. 2019;(10):714. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00714>
3. Shashko A.Yu., Bondarenko V.Yu., Chernysh M.A., Przhevalskaya D.A., Usnich S.L., Pshibytko N.L., et al. Modern Phenomic Platforms and their Application in Plant Biology and Agriculture. *Journal of the Belarusian State University. Biology*. 2020;(2):15–25. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.33581/2521-1722-2020-2-15-25>
4. Kuznetsov I.Yu., Dmitriev A.M., Avsakhov F.F., Alimgafarov R.R., Rodionov N.Yu. Adaptive Potential of Collection Samples of Field Pea: Assessment of Plasticity and Stability in the Conditions of the Republic of Bashkortostan. *Legumes and Groat Crops*. 2026;1(57):17–26. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.24412/2309-348X-2026-1-17-26>
5. Daba S.D., Morris C.F. Pea Proteins: Variation, Composition, Genetics, and Functional Properties. *Cereal Chemistry*. 2022;99(1):8–20. <https://doi.org/10.1002/cche.10439>
6. Gabitov I.I., Safin F.R., Katkov A.A., Shamukaev S.B., Kazmiruk A.C. Development of Computer Vision Algorithms for Digital Phenotyping of Peas. *Vestnik of the Bashkir State Agrarian University*. 2026;(1):109–113. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.31563/1684-7628-2026-77-1-109-113>
7. Furbank R.T., Tester M. Phenomics – Technologies to Relieve the Phenotyping Bottleneck. *Trends in Plant Science*. 2011;16(12):635–644. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2011.09.005>
8. Fiorani F., Schurr U. Future Scenarios for Plant Phenotyping. *Annual Review of Plant Biology*. 2013;(64):267–291. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050312-120137>
9. Luo Z., Yang W., Yuan Y., Gou R., Li X. Semantic Segmentation of Agricultural Images: A Survey. *Information Processing in Agriculture*. 2024;11(2):172–186. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2023.02.001>
10. Lei L., Yang Q., Yang L., Shen T., Wang R., Fu C. Deep Learning Implementation of Image Segmentation in Agricultural Applications: A Comprehensive Review. *Artificial Intelligence Review*. 2024;(57):149. <https://doi.org/10.1007/s10462-024-10775-6>
11. Mudarisov S.G., Miftakhov I.R., Farkhutdinov I.M., Shafeeva E.I. Development of a Low-Power Onboard System for Spot Detection of Wheat Phytopathologies Using a Modified YOLO Architecture. *Engineering Technologies and Systems*. 2026;36(1):114–139. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.036.202601.114-139>
12. Arinichev I.V., Polyanskikh S.V., Arinicheva I.V. Semantic Segmentation of Rusts and Spots of Wheat. *Computer Optics*. 2023;47(1):118–125. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-1130>
13. Liu F., Yang R., Chen R., Guindo M.L., He Y., Zhou J., et al. Digital Techniques and Trends for Seed Phenotyping Using Optical Sensors. *Journal of Advanced Research*. 2024;(63):1–16. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2023.11.010>

14. Warman C., Sullivan C.M., Preece J., Buchanan M.E., Vejlupekova Z., Jaiswal P., et al. A Cost Effective Maize Ear Phenotyping Platform Enables Rapid Categorization and Quantification of Kernels. *The Plant Journal*. 2021;106(2):566–579. <https://doi.org/10.1111/tpj.15166>
15. Minervini M., Fischbach A., Schar H., Tsafaris S.A. Finely-Grained Annotated Datasets for Image-Based Plant Phenotyping. *Pattern Recognition Letters*. 2016;(81):80–89. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2015.10.013>
16. Schar H., Minervini M., French A.P., Klukas C., Kramer D.M., Liu X., et al. Leaf Segmentation in Plant Phenotyping: A Collation Study. *Machine Vision and Applications*. 2016;(27):585–606. <https://doi.org/10.1007/s00138-015-0737-3>
17. Ubbens J.R., Stavness I. Deep Plant Phenomics: A Deep Learning Platform for Complex Plant Phenotyping Tasks. *Frontiers in Plant Science*. 2017;(8):1190. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01190>
18. Pound M.P., Burgess A.J., Wilson M.H., Atkinson J.A., Griffiths M., Jackson A.S. Deep Machine Learning Provides State-of-the-Art Performance in Image-Based Plant Phenotyping. *GigaScience*. 2016. <https://doi.org/10.1101/053033>
19. Bhagat S., Kokare M., Haswani V., Hambarde P., Kamble R. Eff-UNet++: A Novel Architecture for Plant Leaf Segmentation and Counting. *Ecological Informatics*. 2022;(68):101583. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101583>
20. Rakutko S.A., Rakutko E.N., Su J. Estimating Chlorophyll Content by Optical Density of Plant Leaves Using Machine Learning. *Engineering Technologies and Systems*. 2025;35(4):678–699. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202504.678-699>
21. Belousov I.S., Rogachev A.F. Creation a Neural Network Service for Identifying Problem Areas of Agricultural Fields. *Proc. of the Lower Volga Agro-University Comp.* 2021;3(63):439–448. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2021-03-45>
22. 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 in Images of Unmanned Aerial Vehicles in an Agricultural Field. *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>
23. Yasrab R., Atkinson J.A., Wells D.M., French A.P., Pridmore T.P., Pound M.P. RootNav 2.0: Deep Learning for Automatic Navigation of Complex Plant Root Architectures. *GigaScience*. 2019;8(11):123. <https://doi.org/10.1093/gigascience/giz123>
24. Smith A.G., Han E., Petersen J., Olsen N.A.F., Giese C., Athmann M., et al. RootPainter: Deep Learning Segmentation of Biological Images With Corrective Annotation. *New Phytologist*. 2022;236(2):774–791. <https://doi.org/10.1111/nph.18387>
25. Atkinson J.A., Pound M.P., Bennett M.J., Wells D.M. Uncovering the Hidden Half of Plants Using New Advances in Root Phenotyping. *Current Opinion in Biotechnology*. 2018;(55):1–8. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2018.06.002>
26. Kuijken R.C.P., Eeuwijk F.A., Marcelis L.F.M., Bouwmeester H.J. Root Phenotyping: from Component Trait in the Lab to Breeding. *Journal of Experimental Botany*. 2015;66(18):5389–5401. <https://doi.org/10.1093/jxb/erv239>
27. Carranza-Rojas J., Goëau H., Bonnet P., Mata-Montero E., Joly A. Going Deeper in the Automated Identification of Herbarium Specimens. *BMC Evolutionary Biology*. 2017;(17):181. <https://doi.org/10.1186/s12862-017-1014-z>
28. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. In: Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015. MICCAI 2015: Lecture Notes in Computer Science. Springer; Cham. 2015. pp. 234–241. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_28
29. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Deep Residual Learning for Image Recognition. In: 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Las Vegas: IEEE. 2016. pp. 770–778. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.90>

30. Buda M., Maki A., Mazurowski M.A. A Systematic Study of the Class Imbalance Problem in Convolutional Neural Networks. *Neural Networks*. 2018;(106):249–259. <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2018.07.011>
31. Sudre C.H., Li W., Vercauteren T., Ourselin S., Cardoso M.J. Generalised Dice overlap as a Deep Learning Loss Function for Highly Unbalanced Segmentations. In: *Deep Learning in Medical Image Analysis and Multimodal Learning for Clinical Decision Support*. Lecture Notes in Computer Science. 2017. pp. 240–248. https://doi.org/10.1007/978-3-319-67558-9_28

Об авторах:

Габитов Илдар Исагилович, доктор технических наук, ректор Башкирского государственного аграрного университета (450001, Российская Федерация, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, д. 34), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4443-3126>, gabitovildar@gmail.com

Сафин Филос Рансович, доктор технических наук, доцент кафедры электроснабжения и автоматизации технологических процессов Башкирского государственного аграрного университета (450001, Российская Федерация, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, д. 34), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2228-3278>, Researcher ID: F-3892-2018, Scopus ID: 57217827478, SPIN-код: 2947-4312, fls02@mail.ru

Катков Алексей Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности и технологического оборудования Башкирского государственного аграрного университета (450001, Российская Федерация, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, д. 34), ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2065-2705>, ak1409@mail.ru

Дмитриев Алексей Михайлович, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры растениеводства, селекции растений и биотехнологии Башкирского государственного аграрного университета (450001, Российская Федерация, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, д. 34), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1596-7372>, dmitriev-bsau@mail.ru

Казьмирук Алексей Сергеевич, аспирант Башкирского государственного аграрного университета (450001, Российская Федерация, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, д. 34), ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2762-1069>, bsau_kazmiruk@mail.ru

Кашапов Артур Айратович, генеральный директор ООО «Титаниум Диджитал» (450096, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Рудольфа Нуриева, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3724-8586>, omts.bsau@mail.ru

Вклад соавторов:

И. И. Габитов – контроль, лидерство и наставничество в процессе планирования и проведения исследования; применение статистических, математических, вычислительных или других формальных методов для анализа или синтеза данных исследования, создание и подготовка рукописи: написание черновика рукописи.

Ф. Р. Сафин – применение статистических, математических, вычислительных или других формальных методов для анализа или синтеза данных исследования; осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов или сбор данных; проверка воспроизводимости результатов экспериментов и исследования в рамках основных или дополнительных задач работы.

А. А. Катков – создание и подготовка рукописи: написание черновика рукописи; 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. М. Дмитриев – проверка воспроизводимости результатов экспериментов и исследования в рамках основных или дополнительных задач работы.

А. С. Казьмирук – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов или сбор данных.

А. А. Кашапов – деятельность по аннотированию (созданию метаданных), очистке данных и поддержанию их целостности (включая программный код для интерпретации, где это необходимо) для первоначального и повторного использования.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 02.07.2026; поступила после рецензирования 16.07.2026;
принята к публикации 20.07.2026*

About the authors:

Idar I. Gabitov, Dr.Sci. (Eng.), rector, Bashkir State Agrarian University (34, 50-letiya Oktyabrya St., Ufa 450001, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4443-3126>, gabitovildar@gmail.com

Filyus R. Safin, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Power Supply and Automation of Technological Processes, Bashkir State Agrarian University (34, 50-letiya Oktyabrya St., Ufa 450001, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2228-3278>, Researcher ID: F-3892-2018, Scopus ID: 57217827478, SPIN-код: 2947-4312, fils02@mail.ru

Aleksey A. Katkov, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Life Safety and Technological Equipment, Bashkir State Agrarian University (34, 50-letiya Oktyabrya St., Ufa 450001, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2065-2705>, ak1409@mail.ru

Aleksey M. Dmitriev, Cand.Sci. (Agric.), Associate Professor of the Department of Plant Growing, Plant Breeding and Biotechnology, Bashkir State Agrarian University (34, 50-letiya Oktyabrya St., Ufa 450001, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1596-7372>, dmitriev-bsau@mail.ru

Alexey S. Kazmiruk, graduate student, Bashkir State Agrarian University (34, 50-letiya Oktyabrya St., Ufa 450001, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2762-1069>, bsau_kazmiruk@mail.ru

Artur A. Kashapov, general Director of Titanium Digital LLC (1, Rudolf Nuriev St., Ufa 450096, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3724-8586>, omts.bsau@mail.ru

Authors contribution:

I. I. Gabitov – oversight and leadership responsibility for the research activity planning and execution, including mentorship external to the core team; application of statistical, mathematical, computational, or other formal techniques to analyses or synthesize study data; creation of the published work.

F. R. Safin – application of statistical, mathematical, computational, or other formal techniques to analyses or synthesize study data; conducting a research and investigation process, specifically performing the experiments, or data collection; verification, whether as a part of the activity or separate, of the overall replication / reproducibility of results / experiments and other research outputs.

A. A. Katkov – preparation, creation of the published work; revision of the initial text; preparation, creation and of the published work by those from the original research group, specifically critical review, commentary or revision – including pre- or post-publication stages.

A. M. Dmitriev – verification, whether as a part of the activity or separate, of the overall replication / reproducibility of results / experiments and other research outputs.

A. S. Kazmiruk – conducting a research and investigation process, specifically performing the experiments, or data collection.

A. A. Kashapov – management activities to annotate (produce metadata), scrub data and maintain research data (including software code, where it is necessary for interpreting the data itself) for initial use and later re-use.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 02.07.2026; revised 16.07.2026; accepted 20.07.2026

**ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ /
TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT**<https://doi.org/10.15507/2658-4123.26363.541-560>EDN: <https://elibrary.ru/mvvvggp>

УДК / UDK 629.3.083.4:004.9:631.256

*Оригинальная статья / Original article***Оценка эффективности применения
AR-ассистента в техническом сервисе машин****И. А. Уско¹✉, А. А. Долгушин¹, М. В. Шилкина¹, Н. В. Раков²**¹*Сибирский государственный университет
инженерии и биотехнологий,**г. Новосибирск, Российская Федерация*²*Национальный исследовательский
Мордовский государственный университет,**г. Саранск, Российская Федерация, <https://ror.org/0262qgk29>*✉ xxxandryukha36@gmail.com**Аннотация**

Введение. Усложнение конструкций современной сельскохозяйственной техники на фоне системного дефицита квалифицированных инженерных кадров обуславливает рост трудоемкости регламентных работ и повышает риск ошибок при техническом обслуживании. До 15–25 % рабочего времени оператора непроизводительно расходуется на поиск справочной информации в технической документации.

Цель исследования. Повышение эффективности технического обслуживания сельскохозяйственных машин за счет разработки и внедрения программно-аппаратного комплекса «Цифровой ассистент инженера» на базе технологии дополненной реальности.

Материалы и методы. Объектом исследования является технологический процесс ежедневного технического обслуживания трактора John Deere 6125M. Аппаратная часть комплекса реализована на базе промышленных AR-очков RealWear HMT-1, программная – на языке Kotlin с локальной базой данных, обеспечивающей автономную работу. Проведен однофакторный сравнительный эксперимент с участием 50 операторов начального уровня квалификации (контрольная группа – традиционная документация, $n = 25$; опытная группа – AR-ассистент, $n = 25$). Время выполнения операций измерялось методом сплошного хронометража.

Результаты исследования. Установлено статистически значимое сокращение общего времени технического обслуживания на 24,6 % – с $820,6 \pm 123,8$ с до $618,6 \pm 94,8$ с. Декомпозиция затрат показала, что 45,5 % экономии обеспечивается сокращением информационного поиска. Абсолютная вариативность результатов снизилась на 23,4 %.

Заключение. AR-технология эффективно компенсирует недостаток практического опыта у начинающих специалистов, стандартизируя процесс технического

© Уско И.А., Долгушин А.А., Шилкина М.В., Раков Н.В., 2026

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

обслуживания. Годовой экономический эффект составляет 5,61 чел.-ч на единицу техники. Перспективы связаны с применением предлагаемой технологии для сложных видов технического обслуживания и ремонта.

Ключевые слова: технический сервис, дополненная реальность (AR), цифровизация АПК, эксплуатация МТП, трудоемкость работ

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Уско И.А., Долгушин А.А., Шилкина М.В., Раков Н.В. Оценка эффективности применения AR-ассистента в техническом сервисе машин. *Инженерные технологии и системы*. 2026;36(3):541–560. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.26363.541-560>

Evaluation of AR Assistant Effectiveness for Machinery Technical Service

I. A. Usko^a✉, A. A. Dolgushin^a, M. V. Shilkina^a, N. V. Rakov^b

^a*Siberian State University Engineering and Biotechnology, Novosibirsk, Russian Federation*

^b*National Research Mordovia State University, Saransk, Russian Federation, <https://ror.org/0262qgk29>*

✉ xxxandryukha36@gmail.com

Abstract

Introduction. The increasing complexity of modern agricultural machinery design options, coupled with a systemic shortage of qualified engineering personnel, has led to greater routine maintenance labor input and increased risk of errors during maintenance. Up to 15–25% of working time an operator wastes to search reference information in technical documentation.

Aim of the Study. The study is aimed at improving the efficiency of maintenance of agricultural machines by developing and implementing the hardware-software complex “Digital Engineering Assistant” based on augmented reality (AR) technology.

Materials and Methods. The object of the study was the daily maintenance process for the John Deere 6125M tractor. The hardware component of the system was implemented using industrial AR glasses RealWear HMT-1, while the software was developed in Kotlin with a local database ensuring autonomous operation. There was conducted a single-factor comparative experiment involving 50 novice operators (control group: traditional documentation, $n = 25$; experimental group: AR assistant, $n = 25$). The time of performing operations was measured by continuous timing.

Results. The was determined a statistically highly significant reduction in total maintenance time by 24.6% – from 820.6 ± 123.8 s to 618.6 ± 94.8 s. Cost breakdown revealed that 45.5% of the savings resulted from a reduction in information search time. The absolute variability of the results decreased by 23.4%.

Conclusion. AR technology effectively compensates for the lack of practical experience of novice specialists through standardizing the maintenance process. The annual economic benefit is 5.61 person-hours per a unit of equipment. The prospects are determined by applying the proposed technology for complex maintenance and repair operations.

Keywords: technical service, augmented reality (AR), digitalization of the agro-industrial complex, operation of agricultural machinery, labor input of operations

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

For citation: Usko I.A., Dolgushin A.A., Shilkina M.V., Rakov N.V. Evaluation of AR Assistant Effectiveness for Machinery Technical Service. *Engineering Technologies and Systems*. 2026;36(3):541–560. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.26363.541-560>

ВВЕДЕНИЕ

Проблема повышения эффективности технического сервиса машинно-тракторного парка (МТП) остается в числе приоритетных задач аграрной инженерии. По данным исследований, затраты на техническое обслуживание и ремонт составляют до 35 % совокупных эксплуатационных расходов сельскохозяйственных предприятий, при этом значительная их часть обусловлена не стоимостью запасных частей и материалов, а трудоемкостью работ [1]. С. Ю. Журавлев подчеркивает, что современная концепция организации технического сервиса в агропромышленном комплексе (АПК) требует перехода от реактивной (по факту отказа) к превентивной стратегии обслуживания, однако ее реализация ограничена кадровым и информационным дефицитом [2]. R. Khodabakhshian в обзоре систем превентивного обслуживания тракторов и сельскохозяйственных машин отмечает, что стандартизация регламентных процедур является необходимым, но недостаточным условием повышения эффективности – требуются инструменты информационной поддержки оператора [3].

Проблема усугубляется постоянным ростом конструктивной сложности современной агротехники. Ю. А. Царев и О. Ю. Царев показали, что увеличение числа электронных подсистем в сельскохозяйственных машинах закономерно повышает требования к квалификации обслуживающего персонала и удлиняет цикл регламентных работ [4]. С. Л. Никитченко анализирует противоречие между ростом сложности техники и реальным уровнем подготовки кадров, делая вывод о необходимости цифровых инструментов управления техническим обслуживанием (ТО) в условиях автоматизации производства [5]. Аналогичные выводы содержатся в исследованиях, посвященных оценке влияния информационного обеспечения на качество технического сервиса в условиях крупных аграрных предприятий [6].

Таким образом, в научной литературе сформировалось устойчивое понимание проблемы: усложнение техники при дефиците квалифицированных кадров требует новых подходов к информационной поддержке процессов технического сервиса машин. Однако конкретные технологические решения и их количественная оценка остаются предметом дискуссий.

Технология дополненной реальности (Augmented Reality, AR) рассматривается мировым научным сообществом как одно из ключевых направлений цифровизации процессов технического обслуживания в рамках концепции «Индустрия 4.0». Ученые из Португалии в систематическом обзоре, охватывающем период с 1997 по 2023 г., выделяют три поколения AR-систем для технического обслуживания: экспериментальные прототипы (1997–2010), пилотные внедрения (2010–2018) и промышленные решения (с 2018 г.) [7]. Авторы фиксируют устойчивый рост числа публикаций по теме (более 300 статей за последние пять лет) и констатируют переход от лабораторных экспериментов к практическому применению.

Цель исследования заключается в оценке эффективности применения технологии дополненной реальности при выполнении технического обслуживания сельскохозяйственных машин.

Достигнуть поставленной цели позволит разработка автономного AR-приложения «Цифровой ассистент инженера» с модулем автоматизированного импорта технологических карт, системой голосовой навигации и автоматическим формированием отчетности. Необходимо также провести сравнительный эксперимент по оценке влияния AR-ассистента на продолжительность выполнения регламентных операций ежедневного технического обслуживания (ТО-10) трактора John Deere 6125M и выполнить статистический анализ результатов, включая оценку достоверности различий и размера эффекта, а также выявить механизмы повышения эффективности.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В настоящее время проведен систематический обзор 50 работ по AR в техническом обслуживании. Функции AR-систем классифицируются на четыре категории: визуализация процедур, удаленная экспертная поддержка, обучение персонала и контроль качества [8]. Отмечается, что наибольший эффект достигается при выполнении сложных многоэтапных процедур с высокой информационной нагрузкой. AR/VR-технологии в техническом обслуживании обеспечивают повышение эффективности подготовки персонала, поддержку выполнения сервисных операций и снижение влияния недостатка практического опыта операторов [9].

Количественные оценки эффективности AR в техническом обслуживании представлены в ряде экспериментальных исследований. E. Bottani и G. Vignali в обзоре применения AR в производственном секторе за десятилетие (2009–2018) подтвердили статистически значимое сокращение времени выполнения задач (средний размер эффекта $d = 0,8...1,2$ по шкале Коэна) и повышение точности действий операторов [10].

Ряд более поздних исследований подтверждает и уточняет эти результаты. J. Egger и T. Masood в систематическом обзоре AR для интеллектуального производства показали, что эффект AR наиболее выражен при работе с малоопытным персоналом – именно та категория работников, которая испытывает наибольшие затруднения при обращении к традиционной документации [11]. Исследователи из Университета Патры продемонстрировали сокращение времени обслуживания промышленного оборудования на 32 % при использовании AR-инструкций на базе HoloLens 2 и отметили, что критическим фактором успеха является качество структурирования пошаговых инструкций [12]. Исследована проблема когнитивной нагрузки оператора при использовании AR и предложены рекомендации по проектированию информационных элементов, минимизирующих отвлечение внимания [13].

Подход к созданию AR-систем на основе «инженерии знаний», обеспечивающий автоматическое формирование AR-инструкций из существующих баз технических данных [14], концептуально близок к реализованному в настоящем исследовании модулю автоматизированного импорта технологических карт.

Ученые из Германии провели сравнительный эксперимент по использованию AR (Microsoft HoloLens), планшета и бумажных инструкций, в ходе которого было установлено, что AR обеспечивает наибольшее преимущество именно при первом выполнении незнакомой процедуры – сценарий, характерный для ввода в строй молодых специалистов [15].

Разработана и апробирована AR-система для обслуживания судовых дизельных двигателей, зафиксировано сокращение времени выполнения регламентных работ на 27 %, что близко к результатам настоящего исследования (24,6 %) [16]. Особо отмечается значимость автономной работы AR-устройства в условиях ограниченной сетевой инфраструктуры – проблема, также актуальная для сельскохозяйственной эксплуатации.

Вместе с тем анализ литературы выявляет, что абсолютное большинство экспериментальных исследований AR проведено в условиях промышленного производства (авиация, автомобилестроение, энергетика). Применение AR для технического обслуживания мобильных машин, эксплуатируемых в полевых условиях, изучено значительно слабее.

Применение AR/VR-технологий в аграрном секторе находится на ранней стадии исследований. AR преимущественно изучается в контексте точного земледелия (визуализация данных датчиков, навигация) и обучения операторов, тогда как применение AR в техническом сервисе сельскохозяйственной техники представлено единичными работами [17].

Авторы P. Phupattanasilp и S.-R. Tong систематизировали опыт использования AR в сельском хозяйстве и выделили пять основных направлений: обучение, мониторинг посевов, управление животноводством, навигация техники и техническое обслуживание [18]. Они отмечают, что последнее направление исследовано наименее полно.

Отечественные ученые обосновывают внедрение AR-технологий для технического обслуживания сельхозтехники, предлагая использование мобильных решений для оперативного доступа к документации в полевых условиях [19]. Подчеркивается экономическая эффективность внедрения AR за счет сокращения простоев техники и оптимизации работы персонала. Также поставлена проблема интеграции технологических карт ТО в систему дополненной реальности, и обоснована необходимость автоматизированного импорта данных из сервисных баз производителей техники.

Ключевой вклад в разработку отечественных прикладных AR-решений для технического сервиса сельхозтехники внес Р. Д. Гончаров. Автор обосновывает переход на открытые библиотеки, предлагает методы трансформации эксплуатационной документации в интерактивные сценарии и демонстрирует сокращение времени поиска неисправностей через натурные испытания на зерноуборочных комбайнах [20].

Использование дополненной реальности может сократить непроизводительные затраты времени на поиск информации, повысить наглядность технологических операций и снизить зависимость результата от уровня квалификации исполнителя [6]. Близкие выводы получены в исследовании, посвященном применению

интерактивных технологий для технической поддержки в обслуживании сельскохозяйственной техники [7]. В совокупности эти данные подтверждают актуальность перехода от статичной документации к контекстно-зависимым цифровым средствам поддержки.

Таким образом, существует выраженный исследовательский пробел: при обширной доказательной базе эффективности AR и нарастающем интересе к цифровизации аграрного сектора, количественные экспериментальные данные о применении AR при техническом обслуживании сельскохозяйственных тракторов фактически отсутствуют.

Выбор аппаратной платформы является критическим фактором, определяющим практическую применимость AR-решения. Современный рынок предлагает несколько категорий устройств: биноклярные очки с прозрачными дисплеями (Microsoft HoloLens 2, Magic Leap 2), монокулярные промышленные очки (RealWear HMT-1, RealWear Navigator 500, Google Glass Enterprise Edition 2, Vuzix M400), а также планшетные AR-системы [21].

Сравнительный анализ платформ для промышленного применения показал, что для задач «hands-free maintenance» наиболее пригодны монокулярные устройства с голосовым управлением, поскольку они не ограничивают периферийное зрение оператора и обеспечивают максимальную безопасность при работе с техникой [22; 23]. Исследователи сопоставили HoloLens 2 и RealWear HMT-1 в задачах удаленной экспертной поддержки при ремонте оборудования и установили, что RealWear обеспечивает большую субъективную удовлетворенность операторов за счет меньшего веса (380 г и 566 г) и отсутствия перекрытия поля зрения.

Для полевых условий сельскохозяйственной эксплуатации дополнительными критериями выбора являются: класс защиты от пыли и влаги (не ниже IP66), автономность аккумулятора (не менее 8 ч), устойчивость к механическим воздействиям и работоспособность при широком диапазоне температур [17; 19]. RealWear HMT-1 удовлетворяет совокупности указанных требований: IP66, автономность до 10 ч, рабочий диапазон температур от -20 до $+50$ °C, сертификация по стандартам MIL-STD-810G.

Проведенный обзор позволяет сформулировать следующие нерешенные вопросы, определяющие актуальность настоящего исследования:

- отсутствие экспериментальных данных для аграрного сектора. Количественные оценки эффективности AR в техническом сервисе машин получены преимущественно для промышленного оборудования (авиационные двигатели, автомобильные узлы, энергетические установки) [24]. Экспериментальные данные для сельскохозяйственной техники отсутствуют, хотя специфика их обслуживания (разнородность парка, полевые условия, различный уровень квалификации персонала) существенно отличается от промышленных сценариев;
- зависимость существующих AR-решений от сетевой инфраструктуры. Большинство описанных в литературе AR-систем для технического сервиса функционируют в режиме облачного подключения, что неприемлемо для сельскохозяйственной эксплуатации при условиях отсутствия устойчивого интернет-покрытия в сельской местности [19];

– проблема импорта технологических карт. Существующие AR-решения, как правило, требуют ручного создания пошаговых инструкций, что делает масштабирование системы на широкий парк техники экономически неэффективным. Автоматизированный импорт данных из сервисных баз производителей (таких как John Deere Service Advisor) остается нерешенной задачей;

– недостаточная оценка влияния AR на начинающих специалистов. Хотя ряд авторов отмечает, что AR наиболее эффективна при работе с малоопытным персоналом, систематические экспериментальные данные для категории «молодой специалист в сельском хозяйстве» отсутствуют, несмотря на остроту кадровой проблемы в отрасли [11; 15].

Таким образом, актуальной научной задачей является разработка и экспериментальная апробация автономной системы информационной поддержки оператора, адаптированной к полевым условиям эксплуатации сельскохозяйственной техники, оснащенной модулем автоматизированного импорта технологических карт и функционирующей на носимых устройствах класса «hands-free».

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

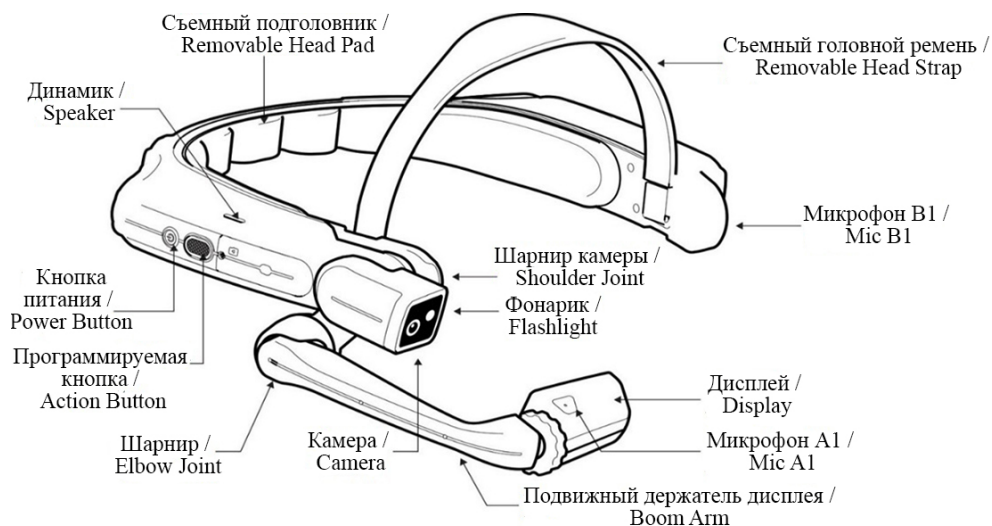
Объект исследования

Объектом исследования являлся технологический процесс ежесменного технического обслуживания (ТО-10) трактора John Deere 6125M (номинальная мощность двигателя – 132 кВт). Выбор данной модели обусловлен ее широкой распространенностью на сельскохозяйственном производстве, высокой насыщенностью электронными и гидравлическими системами, а также наличием детализированного регламента производителя с четко специфицированными контрольными точками.

Методы, оборудование и процедура исследования

В качестве платформы информационной поддержки оператора использованы промышленные AR-очки RealWear HMT-1 (рис. 1). Обоснование выбора данного устройства определялось совокупностью эксплуатационных требований: наличие модуля голосового управления, обеспечивающего режим работы «свободные руки» (hands-free) в соответствии с требованиями охраны труда при обслуживании техники; класс защиты IP66, допускающий эксплуатацию в условиях запыленности и повышенной влажности; монокулярный микродисплей (разрешение 854×480 пикселей), не перекрывающий основное поле зрения оператора; встроенная камера 16 Мп; емкость аккумулятора, обеспечивающая непрерывную работу в течение рабочей смены (до 8 ч).

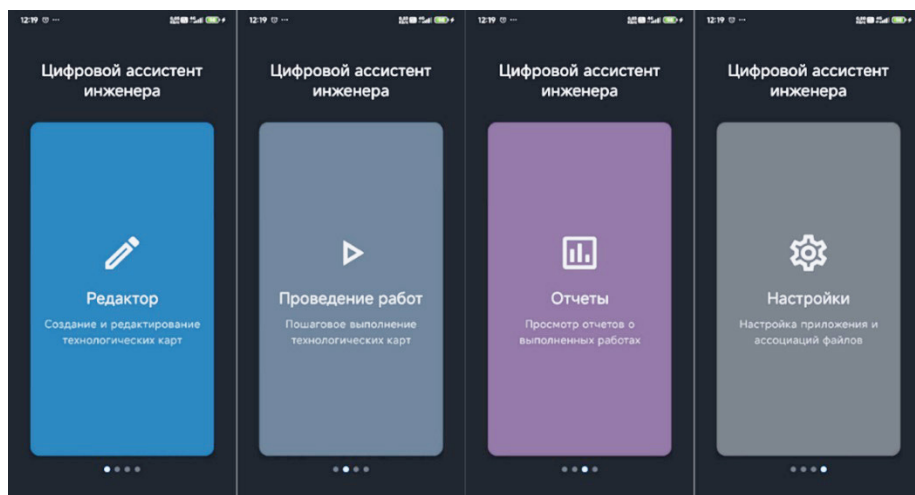
Программная часть комплекса представлена авторским мобильным приложением «Цифровой ассистент инженера», разработанным на языке Kotlin с применением архитектурного паттерна MVVM (Model–View–ViewModel) и принципов Clean Architecture. Ключевой особенностью стала способность работать без подключения к сети благодаря встроенной базе данных Room (SQLite) – это принципиально важно при эксплуатации в условиях удаленных объектов. Главное меню состоит из 4 элементов и представлено на рисунке 2.



Р и с. 1. Схема устройства RealWear HMT-1

F i g. 1. RealWear HMT-1 device schematic

Источник: адаптировано авторами на основе документации к RealWear HMT-1¹.
Source: Figure 1 was adapted by the authors from RealWear HMT-1 documentation.



Р и с. 2. Элементы главного меню приложения «Цифровой ассистент инженера»

F i g. 2. Main menu of the “Digital Engineer Assistant” application

Источник: скриншот экрана программы сделан авторами статьи.

Source: Screenshot of the program screen was made by the authors of the article.

¹ RealWear: сайт [Электронный ресурс]. URL: <https://support.realwear.com/knowledge/realwear-hmt-1> (дата обращения: 03.11.2025).

Регламент ТО-10 предусматривает выполнение семи основных операций (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Table 1

Перечень регламентных операций ежесменного технического обслуживания (ТО-10) трактора John Deere 6125M (согласно шаблону omal226037 John Deere Service Advisor)

List of scheduled shift maintenance operations (SM-10) for John Deere 6125M tractor (according to omal226037 John Deere Service Advisor template)

№	Операция / Operation	Содержание / Description
1	Проверка топливной системы / Fuel system inspection	Визуальный контроль герметичности топливопроводов, состояния фильтров, уровня топлива / Visual inspection of fuel line integrity, filter condition, fuel level
2	Проверка электросистемы / Electrical system inspection	Контроль состояния клемм АКБ, целостности проводки, работоспособности приборов освещения и сигнализации / Inspection of battery terminals, wiring integrity, lighting and signaling operability
3	Проверка уровней технических жидкостей и очистка воздушного фильтра / Fluid level checks and air filter cleaning	Контроль уровней моторного масла, охлаждающей жидкости, гидравлического масла, очистка воздушного фильтра / Check engine oil, coolant, and hydraulic fluid levels; clean the air filter
4	Осмотр баков и магистралей на подтеки масла / Inspection of tanks and lines for oil leaks	Визуальный осмотр узлов на наличие подтеков и капельных течей / Visual examination of assemblies for drips and seepage
5	Слив конденсата из ресивера / Condensate drain from receiver	Открытие сливного клапана, удаление скопившегося конденсата / Opening drain valve, removing accumulated condensate
6	Комплекс смазочных работ / Lubrication service complex	Обслуживание более 15 точек смазки: передняя навеска, шарниры рулевых кулаков переднего моста, шлицевое соединение карданного вала, сцепные устройства, поворотные подшипники, подъемные тяги задней навески, точки заднего моста / Service of 15+ lubrication points: front linkage, front axle steering knuckle joints, driveshaft spline connection, coupling devices, pivot bearings, rear linkage lift arms, rear axle points
7	Оформление документации / Documentation	Заполнение журнала ТО, фиксация выявленных замечаний / Maintenance log entry, recording identified defects

Источник: таблицы 1, 2 составлены авторами статьи.

Source: The tables 1, 2 were compiled by the authors of the article.

Рассмотрели процесс ТО как управляемую систему, выходной параметр которой (время выполнения ТО) определяется совокупностью входных факторов. Общая функциональная зависимость имеет вид:

$$T_{\text{ТО}} = f(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5),$$

где $T_{\text{ТО}}$ – общее время выполнения комплекса регламентных операций, с; X_1 – метод информационного обеспечения оператора (варьируемый фактор); X_2 – уровень квалификации оператора (стаж работы с данным типом техники); X_3 – сложность операции ТО (количество шагов в технологической карте); X_4 – условия внешней среды (освещенность, температура); X_5 – вид технического обслуживания.

Для изоляции влияния исследуемого фактора X_1 на функцию отклика $Y = T_{\text{ТО}}$, факторы $X_2 - X_5$ фиксированы на постоянных уровнях (табл. 2). Таким образом, реализован однофакторный эксперимент с двумя уровнями варьирования:

$$X_1 = \{0 - \text{традиционная документация (CG); } 1 - \text{AR-ассистент (EG)}\},$$

где CG – контрольная группа; EG – опытная группа.

Таблица 2

Table 2

Факторное пространство и условия проведения эксперимента
Factor space and experimental conditions

Фактор / Factor	Обозначение / Symbol	Значение в эксперименте / Experimental value	Статус / Status
Метод информационного обеспечения / Information support method	X_1	0 – традиционная документация (Service Advisor); 1 – AR-ассистент / 0 – conventional documentation; 1 – AR assistant	Варьируемый / Variable
Квалификация оператора / Operator qualification	X_2	Начальный уровень (студенты инженерного профиля, без опыта работы с объектом) / Entry level (engineering students, no prior experience with the object)	Варьируемый / Variable
Сложность операции ТО / Maintenance complexity	X_3	ТО-10: 7 операций, > 15 точек смазки / SM-10: 7 operations, > 15 lubrication points	Фиксирован / Fixed
Условия среды / Environmental conditions	X_4	Закрытый бокс: $t = 20-22\text{ }^{\circ}\text{C}$; $E \geq 300$ лк / Indoor bay: $t = 20-22\text{ }^{\circ}\text{C}$; $E \geq 300$ lx	Фиксирован / Fixed
Вид ТО / Maintenance type	X_5	Ежесменное (ТО-10, периодичность 10 мото-ч) / Shift maintenance (SM-10, interval 10 engine-hours)	Фиксирован / Fixed

Общее время выполнения ТО представлено как сумма временных затрат по каждой из N регламентных операций, при этом время каждой операции структурно декомпозировано на три компонента:

$$T_{\text{ТО}} = \sum_{i=1}^N (t_{\text{imp } i} + t_{\text{inf } i} + t_{\text{next } i}),$$

где $t_{\text{imp } i}$ – время непосредственного выполнения i -й операции (мануальные действия), с; $t_{\text{inf } i}$ – время информационного поиска для i -й операции (обращение к документации, идентификация узлов и контрольных точек), с; $t_{\text{next } i}$ – время перехода между операциями (перемещение вокруг машины, подготовка инструмента), с; N – количество регламентных операций ТО-10.

Рабочая гипотеза исследования базируется на предположении о том, что AR-ассистент оказывает преимущественное воздействие на информационную составляющую $t_{\text{inf } i}$, минимизируя непроизводительные затраты времени на поиск и интерпретацию технической информации. Формально данная гипотеза выражается соотношением:

$$t_{\text{inf } i}^{\text{AR}} = t_{\text{inf } i}^{\text{trad}} \cdot k_{\text{AR}}, \text{ где } 0 < k_{\text{AR}} < 1,$$

где k_{AR} – коэффициент сокращения времени информационного поиска при использовании AR-ассистента (подлежит экспериментальному определению); $t_{inf i}^{AR}$ и $t_{inf i}^{trad}$ – время информационного поиска при традиционном методе и при использовании AR-ассистента соответственно.

Для статистической формализации сравнительного эксперимента принята линейная модель для двух независимых групп:

$$T_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij},$$

где T_{ij} – время выполнения ТО j -м оператором в i -й группе, с; μ – общее среднее значение времени ТО, с; τ_i – фиксированный эффект i -го метода информационного обеспечения ($i = 1 - CG, i = 2 - EG$); ε_{ij} – случайная ошибка, предполагаемая нормально распределенной с нулевым средним и постоянной дисперсией; $j = 1, \dots, n$, где $n = 25$.

Проверяемая статистическая гипотеза: $H_0 : \tau_1 = \tau_2$ (метод информационного обеспечения не влияет на время ТО); $H_0 : \tau_1 \neq \tau_2$ (метод оказывает статистически значимое влияние).

Для проверки гипотезы применили t -критерий Стьюдента для независимых выборок:

$$t_{\text{emp}} = \frac{T_{CG} - T_{EG}}{\sqrt{\frac{S_{CG}^2}{n_{CG}} + \frac{S_{EG}^2}{n_{EG}}}},$$

где T_{CG}, T_{EG} – средние арифметические времена ТО в контрольной и опытной группах, с; S_{CG}^2, S_{EG}^2 – выборочные дисперсии, с²; $n_{CG} = n_{EG} = 25$.

Предварительная проверка допущения о нормальности распределения данных в каждой группе выполнялась по критерию Шапиро – Уилка (W-тест). Нулевая гипотеза о нормальности принималась при $p > 0,05$.

Для количественной оценки практической значимости обнаруженных различий рассчитан размер эффекта по Коэну d :

$$d = \frac{T_{CG} - T_{EG}}{S_p},$$

где S_p – объединенное стандартное отклонение:

$$S_p = \sqrt{\frac{(n_{CG} - 1)S_{CG}^2 + (n_{EG} - 1)S_{EG}^2}{n_{CG} + n_{EG} - 2}}.$$

Интерпретация значений d осуществлялась по шкале Коэна: $d = 0,2$ – малый эффект; $d = 0,5$ – средний; $d \geq 0,8$ – большой эффект.

Относительный коэффициент повышения эффективности рассчитали:

$$\eta = \frac{T_{CG} - T_{EG}}{T_{CG}} \cdot 100 \, \%.$$

Генеральную совокупность составили студенты инженерного профиля Сибирского государственного университета инженерии и биотехнологий с начальным уровнем квалификации (отсутствие практического опыта работы с объектом исследования). Выбор данной генеральной совокупности обоснован тем, что он моделирует практически значимую ситуацию ввода в строй молодых специалистов – наиболее массовую категорию операторов, испытывающих затруднения при проведении регламентных работ. Общий объем выборки составил $N = 50$ человек. Распределение по группам выполнено методом простой рандомизации:

Контрольная группа: $n_{CG} = 25$ операторов, выполнявших ТО-10 с использованием стандартного шаблона omal226037 John Deere Service Advisor (текстовые инструкции с графическими приложениями на экране планшета).

Опытная группа: $n_{EG} = 25$ операторов, выполнявших ТО-10 с применением программно-аппаратного комплекса «Цифровой ассистент инженера» на очках RealWear HMT-1.

Объем выборки ($n = 25$ в каждой группе) определен, исходя из требований к репрезентативности данных в экспериментальных исследованиях, и обеспечивает выполнение условий применимости параметрических критериев. Нормальность распределения в каждой группе подтверждена критерием Шапиро – Уилка ($p > 0,05$).

Для обеспечения внутренней валидности эксперимента условия его проведения были стандартизированы:

- работы выполнялись в закрытом лабораторном боксе кафедры эксплуатации машинно-тракторного парка;
- температура воздуха поддерживалась в диапазоне 20–22 °С;
- искусственная освещенность рабочей зоны не менее 300 лк (контроль поверенным люксметром ТКА-ПКМ, класс точности 2);
- перед каждым замером оборудование трактора приводилось в стандартное исходное состояние (унификация стартовых условий);
- каждому оператору перед началом работы предоставлялся одинаковый по продолжительности (5 мин) вводный инструктаж по соответствующему методу (шаблон Service Advisor – для CG, AR-очки – для EG);
- порядок выполнения операций соответствовал технологической карте производителя и был идентичен для обеих групп.

Измерение времени выполнения регламентных операций проводилось методом сплошного хронометража с использованием сертифицированного электронного секундомера «Интеграл С-01» (дискретность 0,1 с). Фиксировалось общее время полного цикла ТО-10.

Хронометрирование осуществлялось одним и тем же наблюдателем для исключения субъективной погрешности между замерщиками. Данные протоколировались в электронную таблицу для последующей статистической обработки.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе эксперимента выполнен сравнительный хронометраж семи регламентных операций ТО-10 трактора John Deere 6125M в контрольной и опытной группе. Результаты представлены в таблице 3.

Сравнительный хронометраж операций ТО-10 трактора John Deere 6125M (N = 50)**Comparative timing of SM-10 operations for John Deere 6125M tractor (N = 50)**

№	Операция / Operation	CG, с (M ± SD) / CG, s (M ± SD)	EG, с (M ± SD) / EG, s (M ± SD)	Δ, %	t_{emp}	p
1	Проверка топливной системы / Checking fuel system	78,4 ± 14,8	68,2 ± 10,6	13,0	2,80	< 0,010
2	Проверка электросистемы / Che- cking electrical system	91,2 ± 15,8	80,4 ± 11,6	11,8	2,76	< 0,010
3	Проверка уровней жидкостей и очистка воздушного фильтра / Checking fluid levels and cleaning the air filter	108,6 ± 19,4	94,8 ± 14,2	12,7	2,87	< 0,010
4	Осмотр баков и магистралей на под- теки / Tank and line leak inspection	74,2 ± 13,2	68,6 ± 10,8	7,5	1,64	> 0,050
5	Слив конденсата из ресивера / Con- densate drain from receiver	38,6 ± 8,4	36,2 ± 7,4	6,2	1,07	> 0,050
6	Комплекс смазочных работ* / Lu- brication service complex*	336,4 ± 56,8	270,4 ± 38,6	19,6	4,81	< 0,001
7	Оформление документации / Docu- mentation	93,2 ± 17,6	0**	100,0	–	–
Общее время / Total time		820,6 ± 123,8	618,6 ± 94,8	24,6	6,48	< 0,001

Примечание: *Комплекс смазочных работ включает обслуживание более 15 точек смазки: передняя навеска, шарниры рулевых кулаков переднего моста, шлицевое соединение карданного вала, сцепные устройства, поворотные подшипники, подъемные тяги задней навески, точки заднего моста (согласно регламенту производителя); **Формирование отчетной документации выполняется автоматически модулем программы «Цифровой ассистент инженера» в процессе проведения операций 1–6 без дополнительных затрат времени оператора.

Note: *Lubrication service complex includes servicing of 15+ lubrication points: front linkage, front axle steering knuckle joints, driveshaft spline connection, coupling devices, pivot bearings, rear linkage lift arms, rear axle points (per manufacturer's schedule); **Report documentation is generated automatically by the "Digital Engineer Assistant" software module during operations 1–6 requiring no additional operator time.

Общая продолжительность выполнения ТО-10 при использовании AR-ассистента сократилась на 202,0 с, что составляет 24,6 % – с $820,6 \pm 123,8$ с в контрольной группе до $618,6 \pm 94,8$ с в опытной группе.

Незначимое ($p > 0,05$) сокращение зафиксировано на операциях с преобладанием простых мануальных действий: осмотр баков и магистралей на подтеки и слив конденсата из ресивера. Последняя операция является элементарным механическим действием (открытие сливного клапана), при котором информационный поиск практически отсутствует, поэтому AR-ассистент не обеспечивает значимого преимущества. Данный результат подтверждает рабочую гипотезу о преимущественном воздействии AR на информационную составляющую процесса t_{inf} : чем выше доля информационного поиска в операции, тем больше эффект от применения AR.

Мануальная составляющая (непосредственное выполнение технических действий) сократилась незначительно – на 2,2 % (с 532,0 до 520,2 с). Данное сокращение объясняется более уверенными и точными действиями операторов, получающих пошаговые визуальные инструкции, что снижает количество повторных

и корректирующих движений. Время переходов между операциями уменьшилось на 6,6 % (с 75,4 до 70,4 с) за счет оптимизации маршрута оператора вокруг машины, обеспечиваемой логической последовательностью шагов в AR-карте.

Согласно общепринятой шкале Коэна ($d = 0,2$ – малый эффект; $d = 0,5$ – средний эффект; $d \geq 0,8$ – большой эффект), полученное значение $d = 1,83$ свидетельствует об очень большом размере эффекта, существенно превышающем порог 0,8. Внедрение AR-ассистента оказывает выраженное практическое воздействие на продолжительность ТО.

ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ данных таблицы 3 выявляет два принципиально различных механизма повышения эффективности.

Первый механизм – автоматизация документирования. Операция 7 «Оформление документации» полностью исключена из рабочего цикла оператора опытной группы. Модуль автоматической отчетности AR-ассистента фиксирует хронометрические данные и результаты каждой операции в фоновом режиме по мере их выполнения и формирует готовый протокол без участия оператора.

Второй механизм – сокращение информационного поиска. В числе технологических операций (позиции 1–6) максимальный результат отмечен при выполнении операции 6 «Комплекс смазочных работ» – уменьшение на 19,6 % (переход от $336,4 \pm 56,8$ с к $270,4 \pm 38,6$ с, $t_{\text{emp}} = 4,81$, $p < 0,001$). Эта операция отличается наивысшей информационной сложностью, так как специалисту требуется определить местоположение и последовательно обработать более 15 смазочных узлов, размещенных в разных секциях трактора. В контрольной группе существенная часть времени уходила на локализацию точек смазки согласно схемам технической документации и их сопоставление с реальными компонентами техники. В свою очередь, AR-ассистент предоставлял поэтапную визуализацию каждого смазочного узла с текстовыми подсказками и графическими указателями, что дало возможность заметно сократить данный нерезультативный этап.

Таким образом, AR-ассистент сокращает время информационного поиска в среднем на 77 %. Остаточные 28,0 с приходятся на минимальное время восприятия AR-подсказок (чтение текстовой инструкции на дисплее, распознавание визуального маркера), которое не может быть полностью элиминировано.

Полученное сокращение времени ТО на 24,6 % согласуется с результатами зарубежных исследований применения AR в техническом обслуживании промышленного оборудования. Согласно систематическому обзору A. Malta, T. Farinha и M. Mendes, типичный диапазон сокращения времени проведения технических операций при использовании AR составляет 15–45 % в зависимости от сложности задачи и типа AR-устройства [7]. Полученный результат (24,6 %) попадает в нижнюю часть указанного диапазона, что объясняется спецификой ежедневного ТО: данный вид обслуживания включает значительную долю простых мануальных операций, на которые AR не оказывает существенного влияния. Для более сложных видов ТО (ТО-1, ТО-2, ТО-3) с большим объемом информационно-насыщенных операций можно прогнозировать более выраженный эффект.

Отдельного внимания заслуживает размер эффекта $d = 1,83$. В метаанализе E. Bottani и G. Vignali, обобщившем результаты 20 экспериментальных исследований AR в промышленности, средний размер эффекта составил $d = 0,8\text{--}1,2$ [10]. Полученное в настоящем исследовании значение $d = 1,83$ превышает этот диапазон, что может объясняться двумя факторами: участники с начальным уровнем квалификации в наибольшей степени выигрывают от информационной поддержки AR; дополнительный вклад вносит автоматизация документирования – механизм, отсутствующий в большинстве ранее изученных AR-систем.

Вместе с тем необходимо подчеркнуть, что полученные результаты являются одними из первых количественных данных о применении AR молодыми специалистами при техническом обслуживании сельскохозяйственных тракторов, что определяет их научную новизну.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенного исследования сформулированы следующие основные результаты и выводы.

Разработан программно-аппаратный комплекс «Цифровой ассистент инженера», реализованный на базе промышленных AR-очков RealWear HMT-1 и авторского мобильного приложения на языке Kotlin. Отличительными особенностями комплекса являются: полная автономность функционирования (локальная база данных Room/SQLite), модуль автоматизированного импорта технологических карт из сервисных баз производителей техники, система голосовой навигации по пунктам технологической карты и модуль автоматического формирования отчетной документации.

Доказано, что применение AR-ассистента обеспечивает статистически значимое ($t_{\text{emp}} = 6,48$, $p < 0,001$, $d = 1,83$) сокращение общего времени выполнения ТО-10 трактора John Deere 6125M на 24,6 % (с $820,6 \pm 123,8$ с до $618,6 \pm 94,8$ с). Помимо этого, применение AR-ассистента снижает общую вариативность результатов на 23,4 %, что свидетельствует о нивелировании индивидуальных различий в уровне подготовки молодых специалистов.

Установлено, что повышение эффективности обеспечивается значительным сокращением времени информационного поиска и автоматизацией процесса документирования. Суммарный вклад этих механизмов составляет 91,6 % от общего сокращения времени проведения ТО. Таким образом, с учетом масштабируемости решения и независимости от интернет-инфраструктуры, разработанная AR-технология представляет собой применимый метод повышения эффективности технического сервиса машин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дорохов А.С. Эффективность оценки качества сельскохозяйственной техники и запасных частей. *Агроинженерия*. 2015;(1):31–35. <https://elibrary.ru/tyjhrn>
2. Журавлёв С.Ю. Современная концепция организации технического сервиса машин в АПК. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2021;(3):119–125. URL: <https://orensau.ru/ru/obuniversitete/12/4781-izvestiya-orenburgskogo-gosudarstvennogo-agrarnogo-universiteta> (дата обращения: 03.11.2025).

3. Khodabakhshian R. Maintenance Management of Tractors and Agricultural Machinery: Preventive Maintenance Systems. *CIGR Journal*. 2013;15(4):147–159. URL: <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/2616> (дата обращения: 03.11.2025).
4. Царев Ю.А., Царев О.Ю. Метод повышения эксплуатационной надежности сложных сельскохозяйственных машин. *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2023;(189):153–163. URL: <http://ej.kubagro.ru/archive.asp?y=2023> (дата обращения: 04.12.2025).
5. Никитченко С.Л., Лесник Н.А., Смыков С.В. Управление техническим обслуживанием сельскохозяйственной техники в условиях автоматизации и цифровизации производства. *Агроинженерия*. 2023;25(4):33–42. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-4-33-42>
6. Гончаров Р.Д., Исаев А.Д. Применение интерактивных технологий для технической поддержки в обслуживании сельскохозяйственной техники. *АгроЭкоИнженерия*. 2025;(1):145–158. <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2025-1122-145-158>
7. Malta A., Farinha T., Mendes M. Augmented Reality in Maintenance—History and Perspectives. *Journal of Imaging*. 2023;9(7):142. <https://doi.org/10.3390/jimaging9070142>
8. Palmarini R., Erkoyuncu J.A., Roy R., Torabmostaedi H. A Systematic Review of Augmented Reality Applications in Maintenance. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2018;(49):215–228. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2017.06.002>
9. Yazdi M. Augmented Reality (AR) and Virtual Reality (VR) in Maintenance Training. *Advances in Computational Mathematics for Industrial System Reliability and Maintainability*. 2024:169–183. https://doi.org/10.1007/978-3-031-53514-7_10
10. Bottani E., Vignali G. Augmented Reality Technology in the Manufacturing Industry: A Review of the Last Decade. *Iise Transactions*. 2019;51(3):284–310. <https://doi.org/10.1080/24725854.2018.1493244>
11. Egger J., Masood T. Augmented Reality in Support of Intelligent Manufacturing – A Systematic Literature Review. *Computers & Industrial Engineering*. 2020;(140):106195. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106195>
12. Mourtzis D., Siatras V., Angelopoulos J. Real-Time Remote Maintenance Support Based on Augmented Reality (AR). *Applied Sciences*. 2020;10(5):1855. <https://doi.org/10.3390/app10051855>
13. Gattullo M., Scurati G.W., Fiorentino M., Uva A.E., Ferrise F., Bordegoni M. Towards Augmented Reality Manuals for Industry 4.0: A Methodology. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2019;(56):276–286. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.10.001>
14. Kollatsch C., Klimant P. Efficient Integration Process of Production Data Into Augmented Reality Based Maintenance of Machine Tools. *Production Engineering*. 2021;(15):311–319. <https://doi.org/10.1007/s11740-021-01026-6>
15. Blattgerste J., Streng B., Renner P., Pfeiffer T., Essig K. Comparing Conventional and Augmented Reality Instructions for Manual Assembly Tasks. In: *Proceedings of the 10th International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments*. Corfu: ACM; 2017. pp. 75–82. <https://doi.org/10.1145/3056540.3056547>
16. Masoni R., Ferrise F., Bordegoni M., Gattullo M., Uva A.E., Fiorentino M., et al. Supporting Remote Maintenance in Industry 4.0 through Augmented Reality. *Procedia Manufacturing*. 2017;(11):1296–1302. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.257>
17. Lohan S.K., Prakash C., Lohan N., Kansal S., Karkee M. State-of-the-Art in Real-Time Virtual Interfaces for Tractors and Farm Machines: A Systematic Review. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2025;(231):109947. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.109947>
18. Phupattanasilp P., Tong S.-R. Augmented Reality in the Integrative Internet of Things (AR-IoT): Application for Precision Farming. *Sustainability*. 2019;11(9):2658. <https://doi.org/10.3390/su11092658>
19. Соловьев Д.А., Чумакова С.В., Гончаров Р.Д., Чумаков Р.В. Обоснование внедрения AR-технологий при проведении ТО сельскохозяйственной техники в АПК. *Нива Поволжья*. 2022;(3):3006. <https://doi.org/10.36461/NP.2022.63.3.020>
20. Гончаров Р.Д., Исаев А.Д., Россошанский С.Д., Ружьев В.А., Шахов В.А. Разработка цифровой платформы для обучения работе с сельскохозяйственной техникой. *Известия Оренбургского*

- государственного аграрного университета. 2025;(5):148–154. URL: <https://orensau.ru/ru/obuniversitete/12/4781-izvestiya-orenburgskogo-gosudarstvennogo-agrarnogo-universiteta> (дата обращения: 03.11.2025).
21. Melzer J.E. A Survey of Augmented and Virtual Reality Wearable Displays in Medical and Surgical Applications: Architectures, Requirements, Performance, and Benefits. In: Optical Architectures for Displays and Sensing in Augmented, Virtual, and Mixed Reality (AR, VR, MR) VII: Conference Proceedings. 2026. pp. 155–170. <https://doi.org/10.1117/12.3081439>
 22. Röltgen D., Dumitrescu R. Classification of Industrial Augmented Reality Use Cases. *Procedia CIRP*. 2020;(91):93–100. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.01.137>
 23. Fraga-Lamas P., FernáNdez-CaraméS T.M., Blanco-Novoa ÓS., Vilar-Montesinos M.A. A Review on Industrial Augmented Reality Systems for the Industry 4.0 Shipyard. *Ieee Access*. 2018;(6):13358–13375. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2808326>
 24. Dey A., Billinghamurst M., Lindeman R.W., Swan II J.E. A Systematic Review of 10 Years of Augmented Reality Usability Studies: 2005 to 2014. *Frontiers in Robotics and AI*. 2018;(5):37. <https://doi.org/10.3389/frobt.2018.00037>

REFERENCES

1. Dorokhov A.S. [Efficiency of Quality Assessment of Agricultural Machinery and Spare Parts]. *Agricultural Engineering*. 2015;(1):31–35. (In Russ.) <https://elibrary.ru/tyjhrn>
2. Zhuravlev S.Yu. Modern Concept of Organization of Technical Service of Machines in the Agro-Industrial Complex. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2021;(3):119–125. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://orensau.ru/ru/obuniversitete/12/4781-izvestiya-orenburgskogo-gosudarstvennogo-agrarnogo-universiteta> (accessed 03.11.2025).
3. Khodabakhshian R. Maintenance Management of Tractors and Agricultural Machinery: Preventive Maintenance Systems. *CIGR Journal*. 2013;15(4):147–159. Available at: <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/2616> (accessed 03.11.2025).
4. Tsarev Yu.A., Tsarev O.Yu. Method of Increasing the Operational Reliability of Complex Agricultural Machines. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2023;(189):153–163. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <http://ej.kubagro.ru/archive.asp?y=2023> (accessed 04.12.2025).
5. Nikitchenko S.L., Lesnik N.A., Smykov S.V. Management of Agricultural Machinery Maintenance Under the Automation and Digitalization of Production. *Agricultural Engineering*. 2023;25(4):33–42. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-4-33-42>
6. Goncharov R.D., Isaev A.D. Application of Interactive Technologies for Technical Support of Agricultural Machinery Maintenance. *AgroEcoEngineering*. 2025;(1):145–158. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2025-1122-145-158>
7. Malta A., Farinha T., Mendes M. Augmented Reality in Maintenance—History and Perspectives. *Journal of Imaging*. 2023;9(7):142. <https://doi.org/10.3390/jimaging9070142>
8. Palmarini R., Erkoyuncu J.A., Roy R., Torabmostaedi H. A Systematic Review of Augmented Reality Applications in Maintenance. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2018;(49):215–228. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2017.06.002>
9. Yazdi M. Augmented Reality (AR) and Virtual Reality (VR) in Maintenance Training. *Advances in Computational Mathematics for Industrial System Reliability and Maintainability*. 2024:169–183. https://doi.org/10.1007/978-3-031-53514-7_10
10. Bottani E., Vignali G. Augmented Reality Technology in the Manufacturing Industry: A Review of the Last Decade. *Iise Transactions*. 2019;51(3):284–310. <https://doi.org/10.1080/24725854.2018.1493244>
11. Egger J., Masood T. Augmented Reality in Support of Intelligent Manufacturing – A Systematic Literature Review. *Computers & Industrial Engineering*. 2020;(140):106195. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106195>

12. Mourtzis D., Siatras V., Angelopoulos J. Real-Time Remote Maintenance Support Based on Augmented Reality (AR). *Applied Sciences*. 2020;10(5):1855. <https://doi.org/10.3390/app10051855>
13. Gattullo M., Scurati G.W., Fiorentino M., Uva A.E., Ferrise F., Bordegoni M. Towards Augmented Reality Manuals for Industry 4.0: A Methodology. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2019;(56):276–286. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.10.001>
14. Kollatsch C., Klimant P. Efficient Integration Process of Production Data Into Augmented Reality Based Maintenance of Machine Tools. *Production Engineering*. 2021;(15):311–319. <https://doi.org/10.1007/s11740-021-01026-6>
15. Blattgerste J., Strenge B., Renner P., Pfeiffer T., Essig K. Comparing Conventional and Augmented Reality Instructions for Manual Assembly Tasks. In: Proceedings of the 10th International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments. Corfu:ACM; 2017. pp. 75–82. <https://doi.org/10.1145/3056540.3056547>
16. Masoni R., Ferrise F., Bordegoni M., Gattullo M., Uva A.E., Fiorentino M., et al. Supporting Remote Maintenance in Industry 4.0 through Augmented Reality. *Procedia Manufacturing*. 2017;(11):1296–1302. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.257>
17. Lohan S.K., Prakash C., Lohan N., Kansal S., Karkee M. State-of-the-Art in Real-Time Virtual Interfaces for Tractors and Farm Machines: A Systematic Review. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2025;(231):109947. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.109947>
18. Phupattanasilp P., Tong S.-R. Augmented Reality in the Integrative Internet of Things (AR-IoT): Application for Precision Farming. *Sustainability*. 2019;11(9):2658. <https://doi.org/10.3390/su11092658>
19. Solovyov D.A., Chumakova S.V., Goncharov R.D., Chumakov R.V. Justification for the Implementation of Ar-Technologies in the Maintenance of Agricultural Machinery in the Agro-Industrial Complex. *Niva Povolzh'ya*. 2022;(3):3006. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.36461/NP.2022.63.3.020>
20. Goncharov R.D., Isaev A.D., Rossoshansky S.D., Ruzhev V.A., Shakhov V.A. Development of a Digital Platform for Training in Working with Agricultural Machinery. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2025;(5):148–154. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://orensau.ru/ru/obuniversitete/12/4781-izvestiya-orenburgskogo-gosudarstvennogo-agrarnogo-universiteta> (accessed 03.11.2025).
21. Melzer J.E. A Survey of Augmented and Virtual Reality Wearable Displays in Medical and Surgical Applications: Architectures, Requirements, Performance, and Benefits. In: Optical Architectures for Displays and Sensing in Augmented, Virtual, and Mixed Reality (AR, VR, MR) VII: Conference Proceedings. 2026. pp. 155–170. <https://doi.org/10.1117/12.3081439>
22. Röltgen D., Dumitrescu R. Classification of Industrial Augmented Reality Use Cases. *Procedia CIRP*. 2020;(91):93–100. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.01.137>
23. Fraga-Lamas P., Fernández-Caramés T.M., Blanco-Novoa Ó.S., Vilar-Montesinos M.A. A Review on Industrial Augmented Reality Systems for the Industry 4.0 Shipyard. *Ieee Access*. 2018;(6):13358–13375. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2808326>
24. Dey A., Billingham M., Lindeman R.W., Swan II J.E. A Systematic Review of 10 Years of Augmented Reality Usability Studies: 2005 to 2014. *Frontiers in Robotics and AI*. 2018;(5):37. <https://doi.org/10.3389/frobt.2018.00037>

Об авторах:

Уско Иван Анатольевич, аспирант Сибирского государственного университета инженерии и биотехнологий (630039, Российская Федерация, г. Новосибирск, ул. Добролюбова, д. 160), ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-1932-0804>, SPIN-код: 5563-6698, xxxandryukha36@gmail.com

Долгушин Алексей Александрович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой эксплуатации машинно-тракторного парка Сибирского государственного университета инженерии и биотехнологий (630039, Российская Федерация, г. Новосибирск, ул. Добролюбова, д. 160),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7506-6309>, Scopus ID: 57212168418, SPIN-код: 1470-7343, dolgushin078@mail.ru

Шилкина Мария Валерьевна, аспирант Сибирского государственного университета инженерии и биотехнологий (630039, Российская Федерация, г. Новосибирск, ул. Добролюбова, д. 160), ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-5007-0831>, pandoraqwz@gmail.com

Раков Николай Викторович, кандидат технических наук, доцент Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевицкая, д. 68) ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3687-9371>, SPIN-код: 5593-8618, nikolaymgu@yandex.ru

Вклад авторов:

И. А. Уско – формулирование замысла / идеи исследования, целей и задач; осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов или сбор данных/доказательств; программирование, разработка и проектирование программного обеспечения; написание программного кода и реализация вспомогательных алгоритмов; тестирование существующих компонентов кода; создание и подготовка рукописи: написание черновика рукописи, включая его перевод на иностранный язык.

А. А. Долгушин – контроль, лидерство и наставничество в процессе планирования и проведения исследования; административное управление планированием и проведением 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.

М. В. Шилкина – применение статистических, математических, вычислительных или других формальных методов для анализа или синтеза данных исследования.

Н. В. Раков – деятельность по аннотированию (созданию метаданных), очистке данных и поддержанию их целостности (включая программный код для интерпретации, где это необходимо) для первоначального и повторного использования.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 11.10.2025; поступила после рецензирования 12.11.2026;
принята к публикации 10.03.2026*

About the authors:

Ivan A. Usko, Postgraduate Student, Siberian State University Engineering and Biotechnology (160 Dobrolyubov St., Novosibirsk 630039, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-1932-0804>, SPIN-code: 5563-6698, xxxandryukha36@gmail.com

Alexey A. Dolgushin, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Machinery and Tractor Fleet Operation, Siberian State University Engineering and Biotechnology (160 Dobrolyubov St., Novosibirsk 630039, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7506-6309>, Scopus ID: 57212168418, SPIN-code: 1470-7343, dolgushin078@mail.ru

Maria V. Shilkina, Postgraduate Student, Siberian State University Engineering and Biotechnology (160 Dobrolyubov St., Novosibirsk 630039, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-5007-0831>, pandoraqwz@gmail.com

Nikolay V. Rakov, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3687-9371>, SPIN-code: 5593-8618, nikolaymgu@yandex.ru

Authors contribution:

I. A. Usko – ideas; formulation or evolution of overarching research goals and aims; conducting a research and investigation process, specifically performing the experiments, or data/evidence collection; programming, software development; designing computer programs; implementation of the computer code and supporting algorithms; testing of existing code components; preparation, creation and/or presentation of the published work, specifically writing the initial draft (including substantive translation).

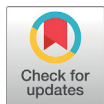
A. A. Dolgushin – oversight and leadership responsibility for the research activity planning and execution, including mentorship external to the core team; management and coordination responsibility for the research activity planning and execution; preparation, creation and/or presentation of the published work by those from the original research group, specifically critical review, commentary or revision – including pre- or post-publication stages.

M. V. Shilkina – application of statistical, mathematical, computational, or other formal techniques to analyse or synthesize study data.

N. V. Rakov – management activities to annotate (produce metadata), scrub data and maintain research data (including software code, where it is necessary for interpreting the data itself) for initial use and later re-use.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 11.10.2025; revised 12.11.2026; accepted 10.03.2026

**ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ /
ELECTRICAL TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT**<https://doi.org/10.15507/2658-4123.26363.561-577>EDN: <https://elibrary.ru/sycylt>

УДК / UDK 628.9.037-035.571:577.182

*Оригинальная статья / Original article***Обнаружение амоксициллина в молоке
методом анализа температурных зависимостей
фотолюминесценции****М. В. Беляков[✉], И. Ю. Ефременков***Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ,
г. Москва, Российская Федерация, <https://ror.org/05fhdx69>*[✉] bmw20100@mail.ru*Аннотация*

Введение. Наличие остаточных количеств антибиотиков в молоке представляет прямую угрозу для здоровья потребителей, провоцируя аллергические реакции и нарушения микрофлоры кишечника. Для производителей молочной продукции данная проблема обуславливает экономические потери из-за некондиционного состояния существенного количества партий сырья. Бесконтактный фотолюминесцентный контроль наличия амоксициллина в молоке позволит существенно повысить качество продукции и снизить экономические затраты на покупку одноразовых тест-систем. Для входного контроля сырья на перерабатывающих предприятиях и защиты прав потребителей необходима разработка чувствительных и оперативных методов диагностики, таких как анализ температурных спектров люминесценции.

Цель исследования. Оценка спектральных характеристик люминесценции молока, загрязненного амоксициллином при изменении температуры, а также определение информативных параметров и диапазонов спектра для полученных зависимостей $\varphi(T)$ при последующей разработке методики контроля наличия антибиотиков в молоке в технологическом процессе.

Материалы и методы. В качестве загрязняемой среды использовали молоко агрофирмы «Мичурино». Контроль наличия амоксициллина осуществляли тест-системой «BIOEASY» 4in1 BSCT. Измерение температурных спектров, а также возбуждения и люминесценции осуществляли на спектрофлуориметре CM 2203. Обработку спектров, расчет чувствительности осуществляли в программе Microcal Origin.

Результаты исследования. При нагревании молока с 10 до 60 °С происходит тушение люминесценции, точка перегиба температурного спектра молока без амоксициллина отличается от молока с амоксициллином. При возбуждении ультрафиолетовым излучением отношение разности интенсивности к температуре уменьшается от 28 до 83 % при добавлении в молоко амоксициллина. Аппроксимации низко- и высокотемпературных областей имеет коэффициент детерминации больше 0,97.

Заключение. Тушение люминесценции молока связано с денатурацией белка при увеличении температуры. Изменение точки перегиба температурных спектров

© Беляков М.В., Ефременков И.Ю., 2026

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

при добавлении амоксициллина в молоко может быть объяснено вкладом антибиотика в скорость денатурации белков. Для диагностики наличия антибиотиков в молоке целесообразно использовать источник излучения с $\lambda = 325$ нм, приемник излучения с режекторным фильтром, либо монохроматором, настроенным на $\lambda = 439$ нм, с последующим построением температурной зависимости в диапазоне 10–36 °C и расчетом чувствительности спектра. Результаты могут быть применены при разработке технологии фотолуминесцентного контроля молока в технологических процессах, связанных с изменением температуры.

Ключевые слова: молоко, амоксициллин, температурные спектры, оптическая диагностика, температурная чувствительность люминесценции

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Беляков М.В., Ефременков И.Ю. Обнаружение амоксициллина в молоке методом анализа температурных зависимостей фотолуминесценции. *Инженерные технологии и системы*. 2026;36(2):561–577. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.26363.561-577>

Determination of the Presence of Amoxicillin in Milk by the Temperature Photoluminescence Properties

M. V. Belyakov[✉], I. Yu. Efremenkov

Federal Scientific Agroengineering Center VIM,
Moscow, Russian Federation, <https://ror.org/05fhdzx69>

✉ bmw20100@mail.ru

Abstract

Introduction. The presence of antibiotic residues of antibiotics in milk poses a direct threat to the health of consumers causing allergic reactions and intestinal microbiota dysbiosis. This problem also results in serious economic losses for dairy producers, because of the substandard condition of a significant amount of raw material batches. Non-contact photoluminescent monitoring of amoxicillin present in milk will significantly improve product quality and reduce the economic costs of purchasing single-use test systems. Therefore, the development of sensitive and operational diagnostic methods, such as the analysis of luminescence temperature spectra, is essential for incoming control of raw materials at processing plants and protecting consumer rights.

Aim of the Study. The article is aimed at studying spectral characteristics of luminescence of amoxicillin-contaminated milk when the temperature changes and at determining informative parameters and spectral ranges to find dependencies $\varphi(T)$ for developing a methodology to monitor the presence of antibiotics in milk in the technological processes.

Materials and Methods. The milk from the agricultural company “Michurino” was used to be contaminated. The presence of amoxicillin was monitored by the test system BIOEASY 4in1 BSCT. The temperature spectra and excitation and luminescence spectra were measured using the spectrofluorimeter CM 2203. The spectra were processed and sensitivity calculated using the software Microcal Origin.

Results. When heating the milk from 10 to 60 °C, the luminescence quenching occurs and the break point of the temperature spectrum of milk without amoxicillin differs from the break point of the temperature spectrum of milk with amoxicillin. When excited by ultraviolet radiation, the ratio of the intensity difference to temperature decreases from 28% to 83% when amoxicillin is added to the milk. The approximations of low-temperature and high-temperature areas have a coefficient of determination greater than 0.97.

Conclusion. Quenching the milk luminescence is related to protein denaturation with increasing temperature. The change in the temperature spectra ibreak point when amoxicillin is

added to milk can be explained by the contribution of the antibiotic to the protein denaturation rate. To detect the presence of antibiotics in milk, it is advisable to use a radiation source of $\lambda = 325$ nm, a radiation receiver with a notch filter or monochromator of $\lambda = 439$ nm, followed by constructing a temperature dependence in the range of 10–36 °C and calculating the spectrum sensitivity. The results can be used for developing photoluminescent milk control technology in technological processes that occur with temperature changes.

Keywords: milk, amoxicillin, temperature spectra, optical diagnostics, temperature sensitivity of luminescence

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

For citation: Belyakov M.V., Efremkov I.Yu. Determination of the Presence of Amoxicillin in Milk by the Temperature Photoluminescence Properties. *Engineering Technologies and Systems*. 2026;36(2):561–577. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.26363.561-577>

ВВЕДЕНИЕ

Повышение безопасности, контроль качества продукции, создание инновационных моделей с применением искусственного интеллекта являются одними из важных задач сельского хозяйства [1]. Внедрение цифровых систем и автоматизированного контроля в сельскохозяйственные предприятия необходимо для конкурентоспособности России [2]. В число таких контрольно-аналитических процедур может входить проверка на остаточное содержание антибиотиков в продуктах питания, в частности, в молоке. Производители сельхозпродукции, применяющие антибиотики, обязаны гарантировать безопасность продукции для потребителя [3; 4].

Пенициллиновая группа антибиотиков – одна из распространенных антибактериальных средств для лечения молочного скота [5]. Так, амоксициллин составляет 40,47 % от общего числа всех применяемых антибиотиков [6]. При бесконтрольном использовании антибиотики могут накапливаться в организме сельскохозяйственного животного и длительное время циркулировать в нем. Впоследствии их соединения могут мигрировать в продукты животноводства, такие как молоко и мясо. При употреблении этих продуктов у потребителя могут возникнуть иммунопатологические эффекты, репродуктивные расстройства и др. [7; 8]. В связи с этим особую актуальность приобретает разработка современных приборов и экспресс-методов для контроля содержания антибиотиков в молоке.

Получение зависимостей интенсивности люминесценции от температуры молока, а также их анализ в зависимости от концентрации амоксициллина позволит дать начало разработке доступных и простых в использовании аналитических приборов. В последующем будет возможен переход к системе тотального входящего и выходного контроля молока как на самой ферме, так и при приеме его на завод. Оптические методы, в том числе основанные на концентрационном и температурном тушении люминесценции, являются быстродействующими, селективными, неразрушающими и относительно недорогими. Применение данных технологий не только будет гарантировать безопасность готовой продукции для потребителя, но и даст экономические выгоды производителям путем предотвращения поступления непригодных партий сырья и экономии на экспресс-тестах, таких как тест-полоски.

Цель исследования – изучение температурных зависимостей спектральных характеристик люминесценции молока при загрязнении амоксициллином для

определения информативных диапазонов и последующей разработки методики контроля наличия антибиотиков. Для этого необходимо: измерить люминесцентные фотосигналы при различных температурах молока; аппроксимировать полученные зависимости и расчет параметров температурной чувствительности люминесценции молока; определить оптимальные длины волн возбуждения при температурном контроле люминесценции молока.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Широкое применение оптических методов для обнаружения антибиотиков в последние двадцать лет объясняется их ключевыми преимуществами: быстрый цикл анализа, высокая чувствительностью и простота [9].

В настоящий момент разработан метод для обнаружения антибиотиков в молоке, основанный на технологии биофотоники [10]. Зарубежные ученые создали оптический плазмонный сенсор, с помощью которого определяется наличие пенициллина в молоке [11], и оптоволоконный датчик для обнаружения бетта-лактамных антибиотиков в продуктах питания [12]. Исследователи из Турции и Китая активно применяют на практике метод поверхностного плазмонного резонанса для обнаружения антибиотиков [13; 14].

Для быстрого и чувствительного обнаружения амоксициллина в молоке широко применяются флуоресцентные зонды [15]. Они позволяют проводить селективный анализ, что делает их перспективной альтернативой традиционным способам [16].

Среди популярных методов диагностики антибиотиков в молоке активно используются современные инструментальные методы, такие как масс-спектрометрия, рамановская, инфракрасная и энергодисперсионная спектроскопия. Они обеспечивают высокую чувствительность и селективность анализа. Например, применение энергодисперсионной спектроскопии позволяет осуществлять детектирование амоксициллина в молоке [17]. На основе поверхностно-усиленной рамановской спектроскопии разработан простой и недорогой метод определения следовых количеств амоксициллина [18]. Остаточное количество амоксициллина в молоке определяется с помощью масс-спектрометрии и жидкостной хроматографии [19]. Коллектив ученых из Бразилии изучил процесс обнаружения амоксициллина с помощью инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье для совершенствования мониторинга антибиотиков [20]. Однако применение данных методов требует наличия дорогостоящего оборудования, квалифицированного персонала и значительного времени на проведение исследований. Это обуславливает их малоприспособленность для повседневного оперативного контроля на фермах, молокозаводах и в пунктах приема сырья.

Использование нанотехнологий, таких как углеродные наноточки, открывает новые возможности для обнаружения следов антибиотиков в молоке. Разработаны углеродные наноточки, легированные азотом, с температурным и флуоресцентным сенсорами для диагностики тинидазола в молоке [21]. Синтезированы высокоаффинные наночастицы, которые используются при разработке сенсора на основе поверхностного плазмонного резонанса для обнаружения ципрофлоксацина, моксифлоксацина и офлоксацина в молоке [22]. Разработан нанофермент на основе полиоксометалата с активностью, имитирующей лакказы, для обнаружения канамицина с помощью колориметрического анализа в молоке [23].

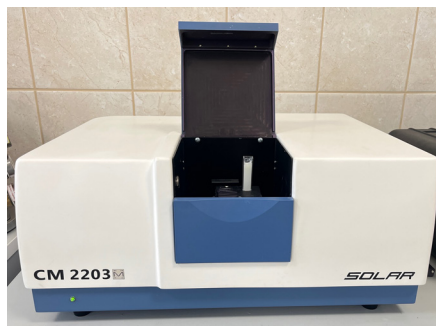
Изучена возможность диагностики амоксициллина в молоке с помощью люминесцентной спектроскопии [24]. С применением тербия Tb(III) разработан способ люминесцентной диагностики левофлоксацина [25]. Велась разработка функционализированного кремниевого нанозонда на основе комплекса европия Eu^{3+} для люминесцентного определения тетрациклина [26].

Анализ литературы показал, что в настоящее время недостаточно информации об изменениях температурных спектров фотолюминесценции при добавлении в молоко амоксициллина. Также неизвестно, может ли данное изменение быть уникальным бесконтактным способом для диагностики остаточных антибактериальных средств в молочном сырье. Ключевым пробелом является отсутствие систематических баз данных о температурных зависимостях молока с антибиотиками. В связи с этим есть необходимость в построении температурных спектров фотолюминесценции в диапазоне 10–60 °C для образцов с разной концентрацией антибиотика, что позволит разработать обоснованный критерий детектирования, не требующий сложной химической пробоподготовки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Методы, оборудование и процедура исследования

В качестве исследуемого материала было использовано молоко агрофирмы «Мичурино» с жирностью 3,2 %. В него добавляли раствор амоксициллина для получения концентрации 0,004 мкг/см³, которая является пороговой в соответствии с Техническим регламентом Таможенного союза 033/2013¹. В качестве арбитражного метода контроля антибиотиков использовали тестовый набор «BIOEASY» 4in1 BSCT. Измерение спектров возбуждения и люминесценции осуществляли в ближнем ультрафиолетовом и видимом диапазоне на спектрофлуориметре CM 2203 (рис. 1).



Р и с. 1. Внешний вид спектрофлуориметра CM 2203

F i g. 1. Appearance of the CM 2203 spectrofluorimeter

Источник: фотография для рисунка 1 сделана авторами статьи в июле 2025 г. в лаборатории Инновационных технологий и технических средств кормления в животноводстве Федерального научного агроинженерного центра ВИМ.

Source: The photo for Figure 1 was taken by the authors of the article in July 2025, in the Laboratory of Innovative Technologies and Technical Means of Feeding in Animal Husbandry of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM.

¹ О безопасности молока и молочной продукции. Технический регламент Таможенного союза 033/2013. URL: <https://docs.cntd.ru/document/499050562> (дата обращения: 12.06.2025).

Данный спектрофлуориметр оборудован термостатируемым держателем для кварцевых кювет. Процесс варьирования температуры молока осуществляли в диапазоне от 10 до 60 °С с шагом 1 °С, параллельно осуществляя спектральные измерения. Система обратной связи на спектрофлуориметре, включающая датчик температуры и нагревательный элемент, автоматически регулировала мощность нагрева для поддержания заданной температуры, что гарантировало высокую стабильность в ходе эксперимента. Контроль температуры проводился в связи с выраженной зависимостью спектральных характеристик биологических объектов от термических условий.

Подбор длин волн для получения спектральных характеристик возбуждения молока осуществляли по максимумам спектральных характеристик при синхронном сканировании. Спектральные характеристики возбуждения молока измеряли с шагом 0,2 нм для получения их максимумов спектров. Полученные максимумы составляли 295, 325, 375 и 457 нм. Далее полученными максимумами длин волн осуществляли возбуждение молока и регистрацию люминесценции, а именно:

- $\lambda_e = 295$ нм, диапазон регистрации 300–450 нм;
- $\lambda_e = 325$ нм, диапазон регистрации 355–650 нм;
- $\lambda_e = 375$ нм, диапазон регистрации 420–660 нм;
- $\lambda_e = 457$ нм, диапазон регистрации 480–660 нм.

Люминесцентные характеристики, как и характеристики возбуждения, измеряли с шагом 0,2 нм, чувствительность фотоэлектронного умножителя «Средняя».

Измерение зависимости спектральной плотности потока от температуры $\varphi(T)$ осуществляли при средней чувствительности фотоэлектронного умножителя и низкой скорости сканирования для минимизации флуктуаций сигнала при измерениях. В качестве длин волн возбуждения и регистрации выбрали значения, являющиеся максимумами спектров возбуждения и люминесценции, а именно: $\lambda_e = 295$ нм, $\lambda_r = 360$ нм; $\lambda_e = 325$ нм, $\lambda_r = 439$ нм; $\lambda_e = 325$ нм, $\lambda_r = 516$ нм; $\lambda_e = 375$ нм, $\lambda_r = 546$ нм; $\lambda_e = 457$ нм, $\lambda_r = 542$ нм.

Обработка результатов измерений

Для объективной оценки «точек излома» Ψ графиков $\varphi(T)$ при изменении их угла наклона осуществляли построение касательных к левому и правому участку кривых. После этого осуществляли их аппроксимацию линейными функциями с последующим расчетом коэффициента детерминации R^2 . В математическом пакете Microcal Origin находили точку пересечения Ψ аппроксимационных кривых. Абсцисса координат данной точки Ψ является граничной температурой излома T .

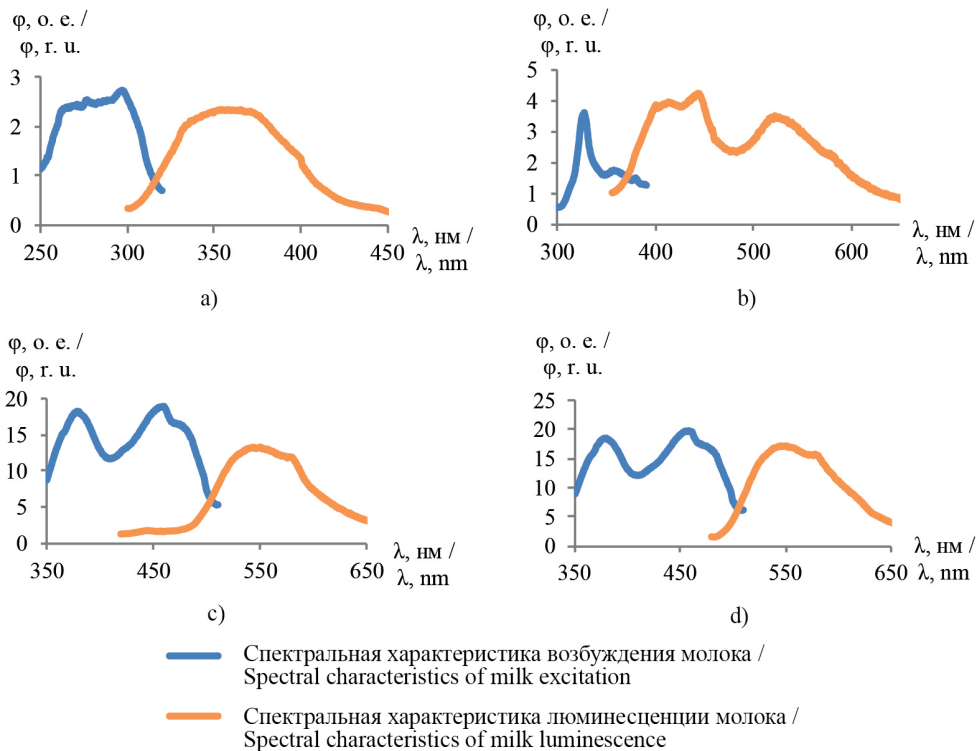
Чувствительность люминесценции S к изменению температуры вычисляли по формуле:

$$S = \frac{\Delta\varphi}{\Delta T}, \quad (1)$$

где $\Delta\varphi$ – разность конечной и начальной интенсивности фотолюминесценции (спектральной плотности потока) на участке температур ΔT , о. е.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На первом этапе были получены спектры возбуждения. По их максимумам были подобраны эффективные длины волн излучения для получения максимального сигнала фотолюминесценции, после чего экспериментально установили оптимальные диапазоны ее регистрации (рис. 2).

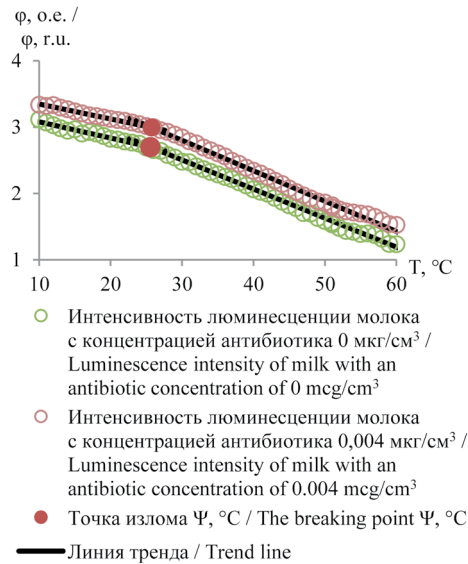


Р и с. 2. Спектральные характеристики возбуждения и люминесценции молока при длинах волн возбуждения: а) 295 нм; б) 325 нм; в) 375 нм; г) 457 нм

F i g. 2. Spectral characteristics of excitation and luminescence of milk at excitation wavelengths: а) 295 nm; б) 325 nm; в) 375 nm; г) 457 nm

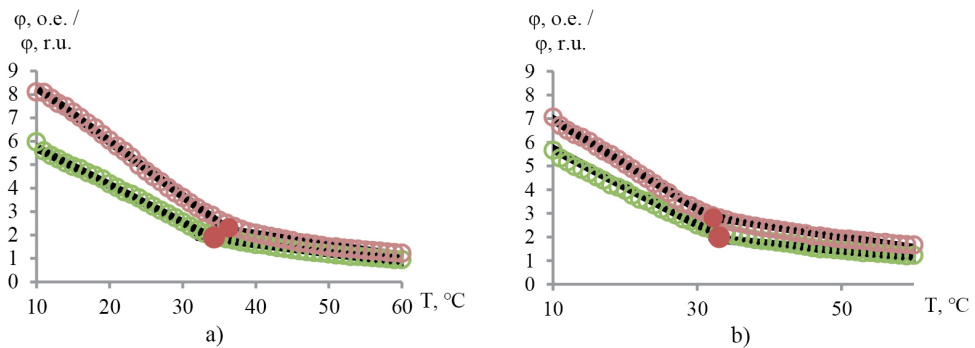
Источник: графики для рисунков 2–6 составлены авторами статьи в программе Microsoft Excel.
Source: Figures 2–6 were compiled by the authors of the article with the use of Microsoft Excel.

На втором этапе были получены температурные спектры фотолюминесценции молока без амоксициллина и с пороговой его концентрацией $0,004 \text{ мкг/см}^3$. На рисунках 3–6 представлены спектры люминесценции молока с амоксициллином и без при возбуждении излучением 295, 325, 375 и 457 нм соответственно, а также их температурные зависимости $\varphi(T)$.



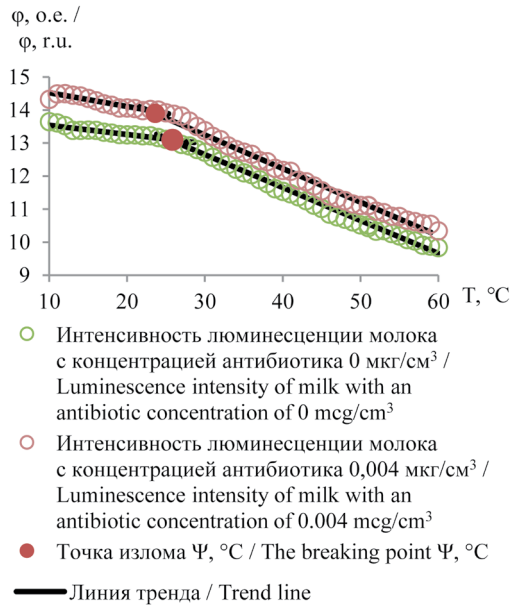
Р и с. 3. Температурные спектры люминесценции при $\lambda_e = 295$ нм, $\lambda_r = 360$ нм молока с различным содержанием амоксициллина

F i g. 3. Temperature spectra of luminescence of milk with different amoxicillin content at $\lambda_e = 295$ nm, $\lambda_r = 360$ nm



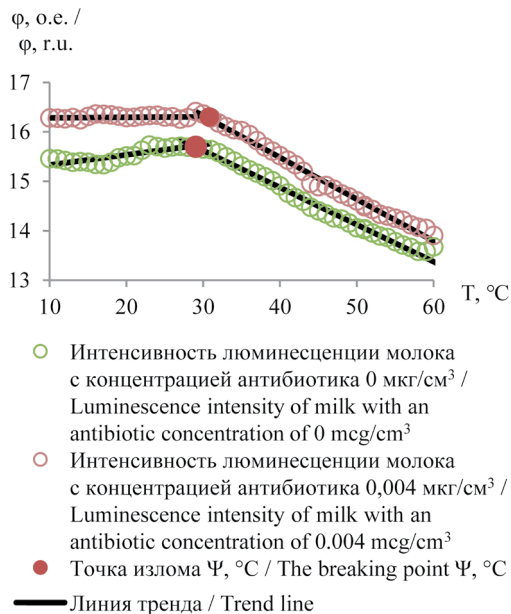
Р и с. 4. Температурные спектры люминесценции молока с различным содержанием амоксициллина: а) $\lambda_e = 325$ нм, $\lambda_r = 439$ нм; б) $\lambda_e = 325$ нм, $\lambda_r = 516$ нм

F i g. 4. Temperature spectra of luminescence of milk with different amoxicillin content: а) $\lambda_e = 325$ nm, $\lambda_r = 439$ nm; б) $\lambda_e = 325$ nm, $\lambda_r = 516$ nm



Р и с. 5. Температурные спектры люминесценции при $\lambda_e = 375$ нм, $\lambda_r = 546$ нм молока с различным содержанием амоксициллина

F i g. 5. Temperature spectra of luminescence of milk with different amoxicillin content at $\lambda_e = 375$ nm, $\lambda_r = 546$ nm



Р и с. 6. Температурные спектры люминесценции при $\lambda_e = 457$ нм, $\lambda_r = 542$ нм молока с различным содержанием амоксициллина

F i g. 6. Temperature spectra of luminescence of milk with different amoxicillin content at $\lambda_e = 457$ nm, $\lambda_r = 542$ nm

Рассчитанные по формуле (1) параметры температурных спектров люминесценции представлены в таблице.

Т а б л и ц а
T a b l e

Интегральные и температурные параметры спектров люминесценции молока
Integral and temperature parameters of milk luminescence spectra

λ_e , нм / λ_e , nm	λ_r , нм / λ_r , nm	Параметры / Parameters	C, мкг/см ³ / C, mcg/cm ³	
			0	0,004
295	360	Точка излома Ψ , °C / The break point Ψ , °C	25,5±0,3	25,7±0,2
		S_{10-26} , о. е./°C / S_{10-26} , г. у./°C	0,029±0,001	0,021±0,001
		S_{26-60} , о. е./°C / S_{26-60} , г. у./°C	0,042±0,001	0,043±0,002
		R^2_{10-26}	0,98±0,10	0,99±0,10
		R^2_{26-60}	0,99±0,10	0,99±0,10
325	439	Точка излома Ψ , °C / The breaking point Ψ , °C	34,3±0,2	36,3±0,3
		S_{10-36} , о. е./°C / S_{10-36} , г. у./°C	0,158±0,006	0,226±0,012
		S_{36-60} , о. е./°C / S_{36-60} , г. у./°C	0,038±0,002	0,042±0,002
		R^2_{10-36}	0,99±0,10	0,98±0,10
		R^2_{36-60}	0,97±0,10	0,99±0,10
	516	Точка излома Ψ , °C / The break point Ψ , °C	32,6±0,3	32,2±0,3
		S_{10-32} , о. е./°C / S_{10-32} , г. у./°C	0,162±0,007	0,196±0,008
		S_{32-60} , о. е./°C / S_{32-60} , г. у./°C	0,032±0,002	0,039±0,002
		R^2_{10-32}	0,99±0,10	0,97±0,10
		R^2_{32-60}	0,97±0,10	0,99±0,10
375	546	Точка излома Ψ , °C / The break point Ψ , °C	25,8±0,4	23,6±0,2
		S_{10-25} , о. е./°C / S_{10-25} , г. у./°C	0,039±0,002	0,028±0,001
		S_{25-60} , о. е./°C / S_{25-60} , г. у./°C	0,091±0,003	0,102±0,005
		R^2_{10-25}	0,97±0,10	0,99±0,10
		R^2_{25-60}	0,92±0,10	0,99±0,10
457	542	Точка излома Ψ , °C / The break point Ψ , °C	29,0±0,3	30,8±0,5
		S_{10-31} , о. е./°C / S_{10-31} , г. у./°C	0,0170±0,0008	0,0030±0,0001
		S_{31-60} , о. е./°C / S_{31-60} , г. у./°C	0,070±0,004	0,084±0,004
		R^2_{10-31}	0,84±0,10	0,31±0,10
		R^2_{31-60}	0,99±0,20	0,99±0,20

Источник: таблица 1 составлена авторами статьи.

Source: The table 1 was compiled by the authors of the article.

Полученные зависимости $\phi(T)$ следует разделить на два участка, каждый из которых можно аппроксимировать линейными характеристиками с точками излома Ψ . Относительная погрешность чувствительностей S не превышает 7 %.

ОБСУЖДЕНИЕ

Температурные характеристики $\varphi(T)$ чистого молока количественно меньше, чем у молока с антибиотиком. Все характеристики можно разделить на две части: с разным наклоном и с выраженными точками излома Ψ . При $\lambda_e = 325$ нм зависимости $\varphi(T)$ вогнутые, а при длинах волн возбуждения 295, 375 и 457 нм – выпуклые.

Возбуждение на 295, 325 и 375 нм определяется в основном триптофаном, витамином А и белками [27–29]. Для $\lambda_e = 457$ нм основной вклад вносит рибофлавин – витамин В2 [30]. Значительное температурное тушение происходит при возбуждении излучением 295 и 325 нм: уменьшение сигнала фотolumинесценции φ относительно начальной (10 °С) и конечной (60 °С) температуры составляет от 60 до 79 %. Данное уменьшение сигнала в основном связано с денатурацией белка и в меньшей степени с флуктуациями триптофана и витамина А, так как в данном температурном диапазоне они практически не разрушаются. При длинах волн возбуждения 375 и 457 нм (рис. 5, 6) уменьшение интенсивности φ в температурном диапазоне 10–60 °С составляет от 12 до 29 %, так как витамин В2 считается стойким по отношению к нагреванию. Не все технологические температурные режимы при производстве молочных продуктов способны привести к разрушению антибактериальных препаратов [31].

Для каждой длины волны возбуждения имеется своя точка излома. Например, для $\lambda_e = 295$ нм и $\lambda_r = 360$ нм – $T = 25,5$ °С; для $\lambda_e = 325$ нм и $\lambda_r = 516$ нм – $T = 32,2$ °С и с добавлением антибиотика практически не изменяется. Для $\lambda_e = 325$ нм и $\lambda_r = 439$ нм, $\lambda_e = 375$ нм и $\lambda_r = 546$ нм – T уменьшается на 2 °С при добавлении амоксициллина. При $\lambda_e = 457$ нм и $\lambda_r = 542$ нм наоборот увеличивается на 1,8 °С. Т. е. по точке излома можно сделать вывод о наличии или отсутствии амоксициллина в молоке.

Чувствительность S , являющаяся отношением разности интенсивности люминесценции и температуры, вычисляемая по формуле (1), для областей с меньшими и большими температурами – разная. Например, с добавлением амоксициллина в молоко для $\lambda_e = 295$ нм и $\lambda_r = 360$ нм, $\lambda_e = 375$ нм и $\lambda_r = 546$ нм, $\lambda_e = 457$ нм и $\lambda_r = 542$ нм чувствительность в диапазоне температур 10–30 °С уменьшается на 38, 28 и 83 % соответственно. Для двумодальной фотolumинесцентной характеристики, возбуждаемой 325 нм и регистрируемой на $\lambda_r = 439$ нм и $\lambda_r = 516$ нм, наоборот увеличивается с добавлением антибиотика на 31 и 18 % соответственно. Расчет чувствительности в высокотемпературном диапазоне при длинах волн регистрации 360 и 439 нм не является информативным. С другой стороны, при $\lambda_r = 516$ нм и 546 нм чувствительность изменяется от 11 до 18 %.

При линейной аппроксимации участков зависимостей $\varphi(T)$ коэффициент детерминации $R^2 > 0,97$ на всех измеряемых длинах волн и температурных диапазонах, кроме $\lambda_e = 457$ нм, $\lambda_r = 542$ нм, где для молока без антибиотиков наблюдается плавномерное изменение сигнала в диапазоне температур от 10–31 °С с $R^2 = 0,84 \pm 0,1$, а с антибиотиками с $R^2 = 0,31 \pm 0,1$. Это может быть связано с влиянием амоксициллина на длинноволновую область возбуждения молока.

Относительная погрешность не превышает 2 % для точек излома Ψ и 5–7 % для чувствительности S в зависимости от температурной области измерения. При

определении коэффициентов детерминации графиков $\varphi(T)$ погрешность составляет до 10 % для длин волн возбуждения 295, 325 и 375 нм. Для длины волны возбуждения 457 нм данная погрешность возрастает до 35 %.

Ограничением исследования является измерения только в тех спектральных диапазонах, где происходит возбуждение фотолюминесценции (коротковолновый видимый и ближний ультрафиолетовый диапазон), а также необходимость учета времени нагрева и охлаждения пробы молока при внедрении данного метода в существующие технологии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные температурные характеристики могут быть учтены при разработке различных методик фотолюминесцентного контроля качества молока (наличие антибиотиков и других посторонних компонентов, кислотность, содержание белков, жиров и др.) в связи с тем, что температура меняется примерно от 37 °С у свежесквашенного молока до 3–5 °С при хранении. При этом меняются количественные параметры люминесценции. Так, наибольшая температурная стабильность фотолюминесцентного сигнала наблюдается при использовании длин волн возбуждения 295, 375 и 457 нм.

Для выявления антибиотиков в молоке по температурным свойствам рекомендуется методика, основанная на регистрации $\varphi(T)$ или интегрального потока $\Phi(T)$ в диапазоне 10–36 °С. При данных температурах молоко не подвергается существенному термическому разрушению. Методика включает в себя следующие этапы:

- возбуждение молока излучением от светодиодов либо лазера при длине волны $\lambda_e = 325$ нм;

- нагревание молока с шагом в 1 °С в диапазоне температур 10–36 °С и регистрация сигнала люминесценции φ на длине волны $\lambda_r = 439$ нм, используя приемник излучения с монохроматором или режекторным фильтром с последующим переводом полученного сигнала в цифровую форму микроконтроллером;

- построение графика $\varphi(T)$ молока с последующим расчетом чувствительности S . Если $S > 0,17$ – в молоке присутствует амоксициллин, если $S < 0,17$ – отсутствует.

Дальнейшим направлением исследования является расширение номенклатуры определяемых антибиотиков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павкин Д.Ю., Юрочка С.С., Никитин Е.А., Рузин С.С., Базаев С.О. Инструменты для сбора и обработки больших данных в сельском хозяйстве. *Техника и технологии в животноводстве*. 2025;15(3):91–101. <https://doi.org/10.22314/27132064-2025-15-3-91>
2. Лобачевский Я.П., Дорохов А.С. Цифровые технологии и роботизированные технические средства для сельского хозяйства. *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021;15(4):6–10. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10>
3. Сулковская А.А., Почницкая И.М., Комарова Н.В. Исследование содержания антибиотиков в пищевых продуктах. *Пищевая промышленность: наука и технологии*. 2023;16(1):85–94. <https://elibrary.ru/edutvk>

4. Костомахин Н.М., Остроухова В.И., Ананьева Т.В. Контроль молока-сырья на содержание антибиотиков. *Ветеринария сельскохозяйственных животных*. 2024;(9):44–48. URL: <https://panor.ru/articles/kontrol-moloka-syrya-na-soderzhanie-antibiotikov/105825.html#> (дата обращения: 04.08.2025).
5. Чаплыгина О.С., Козлова О.В., Жарко М.Ю., Петров А.Н. Оценка биологической безопасности молочных продуктов, содержащих антибиотики. *Техника и технология пищевых производств*. 2023;53(1):192–201. <https://elibrary.ru/mgzxcxf>
6. Юрченко А.А., Глазунова Л.А., Гагарин Е.М., Глазунов Ю.В. Мониторинг контаминации молока-сырья остаточными количествами антибиотиков. *Международный вестник ветеринарии*. 2021;(4):64–69. <https://doi.org/10.52419/issn2072-2419.2021.4.64>
7. Чаплыгина О.С., Просеков А.Ю., Белова Д.Д. Определение остаточного количества антибиотиков в продуктах животного происхождения. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. 2022;84(1):140–148. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2022-1-140-148>
8. Ключева А.В., Зайцева И.А., Роева Н.Н., Воронич С.С. Антибиотики: методы их обнаружения и аналитического контроля в пищевых продуктах. *Экологические системы и приборы*. 2021;(1):29–33. <https://doi.org/10.25791/esip.01.2021.1205>
9. Singh S., Chudasasma M., Singh S., Patra F., Duary R.K. Optical Techniques/Probes for the Detection of Antibiotic Residues in Milk and Dairy Products. *Optical Techniques for Assessing Food Adulterants*. 2025;(35):61–88. https://doi.org/10.1007/978-981-96-8142-6_5
10. Demosthenous P., Aspri M., Moysesos M., Sergides M. MILI: Biophotonics Technology for In-Situ, Fast, Accurate and Cost-Effective Milk Analysis. In: *Proceedings of the 13th International Conference on Photonics: Optics and Laser Technology – PHOTOPTICS*. Porto: SciTePress; 2025;(1):64–73. <https://doi.org/10.5220/0013130100003902>
11. Safran V., Göktürk I., Bakhshpour M., Yılmaz F., Denizli A. Development of Molecularly Imprinted Polymer-Based Optical Sensor for the Sensitive Penicillin G Detection in Milk. *Chemistry Select*. 2021;6(43):11865–11875. <https://doi.org/10.1002/slct.202103058>
12. Nag P., Sadani K., Mohapatra S., Mukherji S., Mukherji S. Evanescent Wave Optical Fiber Sensors Using Enzymatic Hydrolysis on Nanostructured Polyaniline for Detection of β -Lactam Antibiotics in Food and Environment. *Analytical Chemistry*. 2021;93(4):2299–2308. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.0c04169>
13. Bakhshpour M., Göktürk I., Bereli N., Yılmaz F., Denizli A. Selective Detection of Penicillin G Antibiotic in Milk by Molecularly Imprinted Polymer-Based Plasmonic SPR Sensor. *Biomimetics*. 2021;6(4):72. <https://doi.org/10.3390/biomimetics6040072>
14. Zhao Z., Yin H., Xiao J., Cui M., Huang R., Su R. Efficient Sequential Detection of Two Antibiotics Using a Fiber-Optic Surface Plasmon Resonance Sensor. *Sensors*. 2024;24(7):2126. <https://doi.org/10.3390/s24072126>
15. Muthukumar A., Kalaiyar S. Fluorescence Entrenched Probe for Onsite Detection of Amoxicillin Residue in Bovine Milk. *Journal of Fluorescence*. 2025;(35):6387–6398. <https://doi.org/10.1007/s10895-024-03959-4>
16. Shi B., Yin Z., Tang X., Yu H., Cui S., Chen W. Exploration of Novel Dual-Emission NL-CDs/Cu–Cy–I Ratio Fluorescent Probe for the Sensitive Detection of Amoxicillin. *Journal of Materials Chemistry C*. 2024;12(33):13104–13114. <https://doi.org/10.1039/D4TC02183E>
17. Luiz L.C., Bell M.J.V., Batista R.T., Freitas R.P., Rocha R.A., Anjos V. Use of Energy Dispersive Spectroscopy and Principal Component Analysis for Detect Penicillin in Powdered Milk. *Practice and Research in Food Science and Technology*. 2020;(13):1–8. <https://doi.org/10.22533/at.ed.270200603>
18. Khrushchev A.Y., Akmaev E.R., Kis I.V., Gulyaeva A.Yu., Bondarenko V.O. Combination of HPLC and SERS Detection Applied to the Analysis of the Trace Content of Amoxicillin in Milk. *Vibrational Spectroscopy*. 2022;(123):103473. <https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2022.103473>
19. Ouma J., Gachanja A., Mugo S., Gikunju J. Antibiotic Residues in Milk from Juja and Githurai Markets in Kenya by Liquid Chromatography-Tandem Mass Spectrometry. *Chemistry Africa*. 2021;(4):769–775. <https://doi.org/10.1007/s42250-021-00269-1>

20. Anjos V.P., Freire M.R.V.B., Stasi R., Silva D.F.T., Zezell D.M. Fourier Transform Infrared Spectroscopy-Based Detection of Amoxicillin and Ampicillin for Advancing Antibiotic Monitoring with Optical Techniques. *Medical Sciences Forum*. 2025;35(1):7. <https://doi.org/10.3390/msf2025035007>
21. Qian Y., Chen G., Ma C., Li L., Yang T., Zhu C., et al. N-Doped Carbon Nanodots as Temperature Sensors and Fluorescent Probes for the Detection of Tinidazole in Milk. *Journal of Fluorescence*. 2025;(35):7729–7739. <https://doi.org/10.1007/s10895-024-04126-5>
22. Sullivan M.V., Henderson A., Hand R.A., Turner N.W. A Molecularly Imprinted Polymer Nanoparticle-Based Surface Plasmon Resonance Sensor Platform for Antibiotic Detection in River Water and Milk. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 2022;(414):3687–3696. <https://doi.org/10.1007/s00216-022-04012-8>
23. Lu J., Xu X., Chen J. Polyoxometalate-Based Nanozyme with Laccase-Mimicking Activity for Kanamycin Detection Based on Colorimetric Assay. *Microchimica Acta*. 2024;(191):544. <https://doi.org/10.1007/s00604-024-06621-9>
24. Беляков М.В., Ефременков И.Ю. Люминесцентная диагностика амоксициллина в молоке по статистическим параметрам спектров методом дискриминантного анализа. *Вестник КрасГАУ*. 2025;(6):245–256. URL: <https://vestnik.kgau.ru/ru/nauka/article/95507/view> (дата обращения: 03.07.2025).
25. Wang A., Li Y., Zhao W., Liu J. A Tb (III) Coordination Polymer Based on 5-(2-(Pyrazole-1-yl) Pyridine-5-yl) Terephthalic Acid and its Visual Detection of Quinolone Antibiotics. *Polymers*. 2025;17(17):2277. <https://doi.org/10.3390/polym17172277>
26. Zhang Z., Wu M., Phan A.D.T., Alanazi M., Yong J., Xu Z.P., et al. Development of Europium(III) Complex Functionalized Silica Nanoprobe for Luminescence Detection of Tetracycline. *Methods*. 2023;(214):1–7. <https://doi.org/10.1016/j.ymeth.2023.04.003>
27. Ayala N., Zamora A., Rinnan A., Saldo J., Castillo M. The Effect of Heat Treatment on the Front-Face Fluorescence Spectrum of Tryptophan in Skim Milk. *Journal of Food Composition and Analysis*. 2020;(92):103569. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2020.103569>
28. Kamal M., Karoui R. Monitoring of Mild Heat Treatment of Camel Milk by Front-Face Fluorescence Spectroscopy. *LWT – Food Science and Technology*. 2017;(79):586–593. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.11.013>
29. Шишкина Л.Н., Козлов М.В., Константинова Т.В., Смирнова А.Н., Швыдкий В.О. Структурные группы природных фосфолипидов, участвующие в образовании комплексов с флавоноидами. *Химическая физика*. 2023;42(1):28–34. <https://doi.org/10.31857/S0207401X23010107>
30. Астанов С., Шарипов М.З., Файзуллаев А.Р., Курталиев Э.Н., Низомов Н. Термодеструкция рибофлавина в различных агрегатных состояниях. *Журнал прикладной спектроскопии*. 2014;81(1):40–45. <https://elibrary.ru/rstcfn>
31. Свириденко Г.М. Проблемы организации системного контроля антибиотиков в молоке и молочных продуктах. *Молочная промышленность*. 2020;(8):8–12. <https://elibrary.ru/jwugye>

REFERENCES

1. Pavkin D.Y., Yurochka S.S., Nikitin E.A., Ruzin S.S., Bazaev S.O. The Tools for Big Data in Agriculture Collecting and Processing. *Machinery and Technologies in Livestock*. 2025;15(3):91–101. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.22314/27132064-2025-15-3-91>
2. Lobachevskiy Ya.P., Dorokhov A.S. Digital Technologies and Robotic Devices in the Agriculture. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2021;15(4):6–10. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10>
3. Sulkovskaya A.A., Pochickaya I.M., Komarova N.V. Investigation of the Content of Antibiotics in Food Products. *Food Industry: Science and Technologies*. 2023;16(1):85–94. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/edutvk>

4. Kostomahin N.M., Ostrouhova V.I., Ananyeva T.V. Control of Raw Milk for Antibiotics Content. *Veterinariya selskohozyajstvennyh zhivotnyh*. 2024;(9):44–48. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://panor.ru/articles/kontrol-moloka-syrya-na-soderzhanie-antibiotikov/105825.html#> (accessed 04.08.2025).
5. Chaplygina O.S., Kozlova O.V., Zharko M.Yu., Petrov A.N. Assessing the Biological Safety of Dairy Products with Residual Antibiotics. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2023;53(1):192–201. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/mgzxsf>
6. Yurchenko A.A., Glazunova L.A., Gagarin E.M., Glazunov Y.V. Monitoring of Contamination of Raw Milk with Residual Quantities of Antibiotics. *International Journal of Veterinary Medicine*. 2021;(4):64–69. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.52419/issn2072-2419.2021.4.64>
7. Chaplygina O.S., Prosekov A.Y., Belova D.D. Determination of Antibiotic Residues in Animal Products. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2022;84(1):140–148. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2022-1-140-148>
8. Klyueva A.V., Zaytseva I.A., Roeva N.N., Voronich S.S. Antibiotics: Methods for their Detection and Analytical Control in Foods. *Ecological Systems and Devices*. 2021;(1):29–33. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.25791/esip.01.2021.1205>
9. Singh S., Chudasasma M., Singh S., Patra F., Duary R.K. Optical Techniques/Probes for the Detection of Antibiotic Residues in Milk and Dairy Products. *Optical Techniques for Assessing Food Adulterants*. 2025;(35):61–88. https://doi.org/10.1007/978-981-96-8142-6_5
10. Demosthenous P., Aspri M., Moyseos M., Sergides M. MILI: Biophotonics Technology for In-Situ, Fast, Accurate and Cost-Effective Milk Analysis. In: *Proceedings of the 13th International Conference on Photonics: Optics and Laser Technology – PHOTOPTICS*. Porto: SciTePress; 2025;(1):64–73. <https://doi.org/10.5220/0013130100003902>
11. Safran V., Göktürk I., Bakhshpour M., Yilmaz F., Denizli A. Development of Molecularly Imprinted Polymer-Based Optical Sensor for the Sensitive Penicillin G Detection in Milk. *Chemistry Select*. 2021;6(43):11865–11875. <https://doi.org/10.1002/slct.202103058>
12. Nag P., Sadani K., Mohapatra S., Mukherji S., Mukherji S. Evanescent Wave Optical Fiber Sensors Using Enzymatic Hydrolysis on Nanostructured Polyaniline for Detection of β -Lactam Antibiotics in Food and Environment. *Analytical Chemistry*. 2021;93(4):2299–2308. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.0c04169>
13. Bakhshpour M., Göktürk I., Bereli N., Yilmaz F., Denizli A. Selective Detection of Penicillin G Antibiotic in Milk by Molecularly Imprinted Polymer-Based Plasmonic SPR Sensor. *Biomimetics*. 2021;6(4):72. <https://doi.org/10.3390/biomimetics6040072>
14. Zhao Z., Yin H., Xiao J., Cui M., Huang R., Su R. Efficient Sequential Detection of Two Antibiotics Using a Fiber-Optic Surface Plasmon Resonance Sensor. *Sensors*. 2024;24(7):2126. <https://doi.org/10.3390/s24072126>
15. Muthukumar A., Kalaiyar S. Fluorescence Entrenched Probe for Onsite Detection of Amoxicillin Residue in Bovine Milk. *Journal of Fluorescence*. 2025;(35):6387–6398. <https://doi.org/10.1007/s10895-024-03959-4>
16. Shi B., Yin Z., Tang X., Yu H., Cui S., Chen W. Exploration of Novel Dual-Emission NL-CDs/Cu–Cy–I Ratio Fluorescent Probe for the Sensitive Detection of Amoxicillin. *Journal of Materials Chemistry C*. 2024;12(33):13104–13114. <https://doi.org/10.1039/D4TC02183E>
17. Luiz L.C., Bell M.J.V., Batista R.T., Freitas R.P., Rocha R.A., Anjos V. Use of Energy Dispersive Spectroscopy and Principal Component Analysis for Detect Penicillin in Powdered Milk. *Practice and Research in Food Science and Technology*. 2020;(13):1–8. <https://doi.org/10.22533/at.ed.270200603>
18. Khrushchev A.Y., Akmaev E.R., Kis I.V., Gulyaeva A.Yu., Bondarenko V.O. Combination of HPLC and SERS Detection Applied to the Analysis of the Trace Content of Amoxicillin in Milk. *Vibrational Spectroscopy*. 2022;(123):103473. <https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2022.103473>
19. Ouma J., Gachanja A., Mugo S., Gikunju J. Antibiotic Residues in Milk from Juja and Githurai Markets in Kenya by Liquid Chromatography-Tandem Mass Spectrometry. *Chemistry Africa*. 2021;(4):769–775. <https://doi.org/10.1007/s42250-021-00269-1>

20. Anjos V.P., Freire M.R.V.B., Stasi R., Silva D.F.T., Zzell D.M. Fourier Transform Infrared Spectroscopy-Based Detection of Amoxicillin and Ampicillin for Advancing Antibiotic Monitoring with Optical Techniques. *Medical Sciences Forum*. 2025;35(1):7. <https://doi.org/10.3390/msf2025035007>
21. Qian Y., Chen G., Ma C., Li L., Yang T., Zhu C., et al. N-Doped Carbon Nanodots as Temperature Sensors and Fluorescent Probes for the Detection of Tinidazole in Milk. *Journal of Fluorescence*. 2025;(35):7729–7739. <https://doi.org/10.1007/s10895-024-04126-5>
22. Sullivan M.V., Henderson A., Hand R.A., Turner N.W. A Molecularly Imprinted Polymer Nanoparticle-Based Surface Plasmon Resonance Sensor Platform for Antibiotic Detection in River Water and Milk. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 2022;(414):3687–3696. <https://doi.org/10.1007/s00216-022-04012-8>
23. Lu J., Xu X., Chen J. Polyoxometalate-Based Nanozyme with Laccase-Mimicking Activity for Kanamycin Detection Based on Colorimetric Assay. *Microchimica Acta*. 2024;(191):544. <https://doi.org/10.1007/s00604-024-06621-9>
24. Belyakov M.V., Efremenkova I.Yu. Luminescent Diagnostics of Amoxicillin in Milk by Spectra Statistical Parameters by the Discriminant Analysis Method. *Bulletin of KSAU*. 2025;(6):245–256. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://vestnik.kgau.ru/ru/nauka/article/95507/view> (accessed 03.07.2025).
25. Wang A., Li Y., Zhao W., Liu J. A Tb (III) Coordination Polymer Based on 5-(2-(Pyrazole-1-yl) Pyridine-5-yl) Terephthalic Acid and its Visual Detection of Quinolone Antibiotics. *Polymers*. 2025;17(17):2277. <https://doi.org/10.3390/polym17172277>
26. Zhang Z., Wu M., Phan A.D.T., Alanazi M., Yong J., Xu Z.P., et al. Development of Europium(III) Complex Functionalized Silica Nanoprobe for Luminescence Detection of Tetracycline. *Methods*. 2023;(214):1–7. <https://doi.org/10.1016/j.ymeth.2023.04.003>
27. Ayala N., Zamora A., Rinnan A., Saldo J., Castillo M. The Effect of Heat Treatment on the Front-Face Fluorescence Spectrum of Tryptophan in Skim Milk. *Journal of Food Composition and Analysis*. 2020;(92):103569. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2020.103569>
28. Kamal M., Karoui R. Monitoring of Mild Heat Treatment of Camel Milk by Front-Face Fluorescence Spectroscopy. *LWT – Food Science and Technology*. 2017;(79):586–593. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.11.013>
29. Shishkina L.N., Kozlov M.V., Konstantinova T.V., Smirnova A.N., Shvydkiy V.O. [Structural Groups of Natural Phospholipids Taking Part in Complexation with Flavonoids]. *Himicheskaya fizika*. 2023;42(1):28–34. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0207401X23010107>
30. Astanov C., Sharipov M.Z., Faizullaev A.R., Kurtaliev E.N., Nizomov N. [Thermal Destruction of Riboflavin in Different Aggregate States]. *Zurnal prikladnoj spektroskopii*. 2014;81(1):40–45. (In Russ.) <https://elibrary.ru/rstcfv>
31. Sviridenko G.M. [Problems of Organizing Systemic Control of Antibiotics in Milk and Dairy Products]. *Dairy Industry*. 2020;(8):8–12. (In Russ.) <https://elibrary.ru/jwugye>

Об авторах:

Беляков Михаил Владимирович, доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник лаборатории инновационных технологий и технических средств кормления в животноводстве федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4371-8042>, Researcher ID: [ABB-2684-2020](https://orcid.org/0000-0002-4371-8042), bmw20100@mail.ru

Ефременков Игорь Юрьевич, младший научный сотрудник лаборатории инновационных технологий и технических средств кормления в животноводстве федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2302-9773>, Researcher ID: [AGR-5540-2022](https://orcid.org/0000-0003-2302-9773), efremenkovich55@mail.ru

Вклад авторов:

М. В. Беляков – разработка или проектирование методологии 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 исследования.

И. Ю. Ефременков – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов или сбор данных; создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования и полученных данных; написание черновика рукописи.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 18.11.2025; поступила после рецензирования 23.01.2026;
принята к публикации 28.01.2026*

About the authors:

Mikhail V. Belyakov, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Chief Researcher of the Laboratory of Innovative Technologies and Technical Means of Feeding in Animal Husbandry, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5 1st Institute Passage, Moscow 109428, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4371-8042>, Researcher ID: ABB-2684-2020, bmw20100@mail.ru

Igor Yu. Efremenkov, Junior Researcher of the Laboratory of Innovative Technologies and Technical Means of feeding in Animal Husbandry, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5 1st Institute Passage, Moscow 109428, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2302-9773>, Researcher ID: AGR-5540-2022, efremenkovigor55@mail.ru

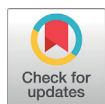
Authors contribution:

M. V. Belyakov – development or design of methodology; preparation, creation of the published work by those from the original research group, specifically critical review, commentary or revision – including pre- or post-publication stages.

I. Yu. Efremenkov – conducting a research and investigation process, specifically performing the experiments collection; Preparation, creation of the published work, specifically visualization and data presentation; specifically writing the initial draft.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 18.11.2025; revised 23.01.2026; accepted 28.01.2026

**ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ /
ELECTRICAL TECHNOLOGY AND ELECTRICAL EQUIPMENT**<https://doi.org/10.15507/2658-4123.26363.578-594>EDN: <https://elibrary.ru/szuvt>

УДК / UDK 621.56:620.91

*Оригинальная статья / Original article***Эффективность теплообмена при нагреве
молока в системе «Солнечный коллектор –
пластинчатый теплообменник»****Ю. Б. Гербер , А. П. Вербицкий***Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского,
г. Симферополь, Российская Федерация, <https://ror.org/05erbjx97>** gerber_1961@mail.ru**Аннотация*

Введение. Переработка сельскохозяйственного сырья требует существенных энергетических затрат, составляющих значительную часть себестоимости готового продукта. Оптимизация системы нагрева продукта теплоносителем в пластинчатом теплообменнике позволит достичь рационального соотношения между скоростью нагрева и энергоэффективностью, что поспособствует улучшению экономических показателей производства.

Цель исследования. Определение зависимостей температуры нагреваемой жидкости от температуры и расхода теплоносителя, а также выявление оптимального соотношения расходов в контурах теплоносителя и нагреваемой жидкости для достижения максимальной эффективности теплопередачи.

Материалы и методы. Для исследования процесса нагрева жидкостным теплоносителем нагреваемой жидкости использовались трубчатый гелиоколлектор и лабораторный пластинчатый теплообменник, соединенные трубопроводами с соответствующей гидравлической арматурой. Исследование проведено при фиксированных расходах нагреваемой жидкости (молока) (3,5, 4,25 и 5,0 л/мин) и переменном расходе теплоносителя (0,80–3,5 л/мин), поступающего из гелиоколлектора. В качестве критерия эффективности работы теплообменника использовался коэффициент отдачи тепла k_o , определяемый как отношение разности температур нагреваемой жидкости к разности температур теплоносителя.

Результаты исследования. Рассмотрен процесс взаимодействия теплоносителя и нагреваемой жидкости (молока) в пластинчатом теплообменнике, работающем в паре с модулем солнечного нагрева. Температура продукта на выходе пропорционально зависит от расхода и температуры теплоносителя. Наибольший рост эффективности наблюдается при увеличении соотношения расходов теплоносителя и нагреваемой жидкости (Q_{nc}/Q_l) в диапазоне от 0,5 до 0,75. Дальнейшее увеличение соотношения до 1,0 ведет к росту в меньшей степени, выше 1,0 – к незначительному приросту эффективности.

© Гербер Ю.Б., Вербицкий А.П., 2026

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

Закключение. Оптимальное для энергетической эффективности соотношение расходов $Q_{hc}/Q_f = 0,7...1,0$. Это позволяет минимизировать энергозатраты на подачу (перекачку) теплоносителя при высоком (более 75 %) коэффициенте отдачи тепла. Результаты могут быть применены при проектировании и эксплуатации энергоэффективных систем подачи теплоносителя в агропромышленной сфере. Для обеспечения низкопотенциальных тепловых процессов и предварительного подогрева при дальнейшей высокотемпературной обработке (пастеризации) экономически целесообразно использование солнечной энергии.

Ключевые слова: эффективность теплообмена, солнечный коллектор, пластинчатый теплообменник, коэффициент отдачи тепла, возобновляемая энергетика, гелиосистема

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Гербер Ю.Б., Вербицкий А.П. Эффективность теплообмена при нагреве молока в системе «Солнечный коллектор – пластинчатый теплообменник». *Инженерные технологии и системы*. 2026;36(3):578–594. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.26363.578-594>

Heat Transfer Efficiency during Heating Milk in a Solar Collector-Plate Heat Exchanger System

Yu. B. Gerber[✉], A. P. Verbitsky

V. I. Vernadsky Crimean Federal University,

Simferopol, Russian Federation, <https://ror.org/05erbjx97>

[✉] gerber_1961@mail.ru

Abstract

Introduction. Processing agricultural raw materials requires significant energy cost that makes up a significant part of the finished product cost. Optimizing the product heating system with a heat transfer fluid in a plate heat transfer unit will allow achieving a rational balance between heating rate and energy efficiency that will help to improve economic indicators of production.

Aim of the Study. The study is aimed at determining the dependences of the temperature of the being heated liquid on the temperature and flow rate of the heat transfer fluid, and at identifying the optimal ratio of the heat transfer fluid flow rate and being heated liquid to achieve maximum heat transfer efficiency.

Materials and Methods. A tubular solar collector and a laboratory plate heat transfer unit connected by pipelines and appropriate hydraulic fittings were used to study the process of heating liquid with a heat transfer fluid. The studies were conducted at fixed flow rates of the being heated liquid (milk) (3.5, 4.25 and 5.0 l/min), and a variable heat transfer fluid flow rate (0.80–3.5 l/min), incoming from the solar collector. As a criterion for the efficiency of the heat transfer unit system, there was used the heat transfer coefficient k_o , which is defined as the ratio of the temperature difference between the being heated liquid (milk) and the temperature differential of the heat transfer fluid.

Results. There have been considered the process of the interaction between a heat transfer fluid and a being heated liquid (milk) in a plate heat transfer unit operating in pairs with a solar heating module. The outlet product temperature depends proportionally on the flow rate and temperature of the heat transfer fluid. The greatest increase in efficiency is observed when the ratio of the heat transfer fluid flow rate and being heated liquid flow rate (Q_{hc}/Q_f) is increased from 0.5 to 0.75. A further increase in the ratio to 1.0 leads to a smaller increase in efficiency, while an increase above 1.0 results in a slight increase in efficiency.

Conclusion. As a result of the conducted study and data processing, there has been found that the optimal ratio Q_{hc}/Q_l for energy efficiency is 0.7...1.0, which minimizes energy consumption for the supply (pumping) of the heat transfer fluid while ensuring a high (more than 75%) heat transfer coefficient. The results can be applied in the design and operation of energy-efficient systems for heat transfer fluid supply in the agro-industrial sector. The use of solar energy is economically feasible for low-potential thermal processes and preheating for further high-temperature processing (pasteurization).

Keywords: heat exchange efficiency, solar collector, plate heat exchanger, heat transfer coefficient, renewable energy, heliosystem

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

For citation: Gerber Yu.B., Verbitsky A.P. Heat Transfer Efficiency during Heating Milk in a Solar Collector-Plate Heat Exchanger System. *Engineering Technologies and Systems*. 2026;36(3):578–594. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.26363.578-594>

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность процессов теплопередачи и теплообмена является одной из ключевых задач в энергетике, пищевой промышленности, холодильной технике и многих других отраслях промышленности. Основным аппаратом, в котором осуществляется данный процесс, является теплообменник, от оптимальных режимов работы которого напрямую зависят энергозатраты, экономические показатели и экологичность технологических циклов. Несмотря на развитый теоретический базис и многообразие конструктивных решений, задача поиска оптимальных режимов эксплуатации для конкретных условий остается актуальной [1–3].

Основными регулируемыми параметрами в системе с двумя контурами (теплоноситель и нагреваемая жидкость – продукт) часто являются их расход и температура на входе¹. При этом температура нагреваемой жидкости на выходе, ключевая целевая переменная, формируется под сложным взаимным влиянием этих факторов. С одной стороны, изменение расходов напрямую влияет на коэффициент теплопередачи, интенсифицируя или замедляя процесс [4]. С другой стороны, оно же определяет величину среднего логарифмического температурного напора – движущей силы процесса. Это приводит к тому, что зависимость конечной температуры от расходов носит экстремальный характер, следовательно, существует такое оптимальное соотношение расходов, при котором эффективность теплопередачи достигает максимума.

Под эффективностью данного процесса можно понимать как максимальную тепловую мощность при фиксированных размерах аппарата, так и минимизацию эксплуатационных затрат, учитывающих энергию на прокачку теплоносителей. Таким образом, увеличение расходов не всегда является рациональным. Требуется научно обоснованный подход к выбору режимных параметров.

Развитие возобновляемой энергетики является одним из ключевых направлений для снижения зависимости от традиционных ископаемых ресурсов и уменьшения

¹ Гухман А.А. Применение теории подобия к исследованию процессов тепло-массообмена (процессы переноса в движущейся среде). М.: Высшая школа; 1974. 328 с.

антропогенной нагрузки на окружающую среду² [5]. Среди технологий возобновляемых источников энергии солнечное теплоснабжение демонстрирует высокую эффективность для систем горячего водоснабжения в условиях умеренного климата³ [6]. Таким образом, сочетание использования менее дорогого источника энергии для теплового процесса и оптимизация теплопередачи позволит повысить эффективность тепловой обработки при производстве продуктов питания, в частности, молочных.

Целью исследования является экспериментальное определение зависимости температуры нагреваемой жидкости и коэффициента отдачи тепла от расхода и температуры теплоносителя в контуре пластинчатого теплообменника, а также выявление оптимального соотношения расходов, обеспечивающего высокую энергетическую эффективность системы. Для этого требуется: создание экспериментальной установки с необходимыми приборами, оборудованием; проведение исследований в солнечное время суток; обработка полученных данных.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Вопросам теплопередачи посвящены классические труды по теории теплообмена авторов А. С. Гухмана⁴, В. П. Исаченко⁵, В. А. Осипова, Дж. Х. Линхард. В работах этих ученых приведены фундаментальные уравнения для расчета конвективного теплообмена и теплопроводности. Ключевой является зависимость коэффициента теплоотдачи от режима течения (критерии Рейнольдса, Прандтля, Нуссельта) и свойств жидкости. И. Е. Семенов, А. Ю. Маскинская, Д. А. Алхасова, Н. Ю. Никулин провели теплотехнические и гидродинамические исследования, направленные на интенсификацию тепловых процессов в пластинчатых аппаратах. Ими также была изложена теория теплообменных аппаратов. В основе конструкции пластинчатых теплообменных аппаратов лежат результаты исследований теплогидродинамических процессов в каналах сложной геометрии [4; 7; 8]. Однако конкретные рекомендации по выбору динамических режимов работы теплообменников в связке с гелиосистемами отсутствуют.

Типовая система солнечного горячего водоснабжения включает в себя гелиоколлектор, теплообменный аппарат и бак-аккумулятор [6; 9]. Пластинчатые теплообменники широко применяются в таких системах благодаря своей компактности, высоким коэффициентам теплопередачи и возможности работы при относительно низких перепадах температур⁶ [10; 11].

² Гухман А.А. Об основаниях термодинамики. М.: Энергоатомиздат; 1986. 384 с.

³ Гухман А.А. Применение теории подобия к исследованию процессов тепло-массообмена (процессы переноса в движущей среде).

⁴ Гухман А. А. Об основаниях термодинамики.

⁵ Исаченко В.П., Солодов А.П., Якушева Е.В. Теплообмен при конденсации водяного пара, содержащего добавки октадециламина, на вертикальной пластине. *Теплоэнергетика*. 1983;(9). URL: <https://unilibrary.ru/articles/journals/teplojenergetika/teplojenergetika-1983/teplojenergetika-1983-09/isachenko-vp-solodov-ap-jakusheva-ev-teploobmen-pri-kondensacii-vodjanogo-para-soderzhashhego-dobavki-oktadecilamina-na-vertikalnoj-plastine> (дата обращения: 15.10.2025).

⁶ Там же.

Эффективность работы всей системы в значительной степени определяется режимом теплообмена между контуром теплоносителя (воды, антифриза) от солнечного коллектора и контуром нагреваемой жидкости (продукта). Применительно к агропромышленному производству это может быть молоко, соки и др. Ключевыми управляющими параметрами в контурах являются расходы [12]. Многие исследования посвящены оценке влияния на протекание процесса конструктивных параметров теплообменника [13–15], поиску оптимальных конструктивных и технологических параметров, а также материалов, повышающих коэффициент полезного действия устройств [16–18].

Неоптимальное соотношение расходов может привести либо к недостаточному использованию теплового потенциала теплоносителя (низкая температура нагреваемой среды на выходе), либо к избыточным энергозатратам на подготовку и подачу теплоносителя через контур гелиоколлектора [19–21]. Кроме того, указанное отклонение негативно сказывается на конструктивных параметрах теплообменника, ведет к неоправданно завышенным размерам установки, увеличению ее массы и повышению стоимости [22]. Несмотря на существование теоретических моделей, практические данные, позволяющие верифицировать эти модели и дать конкретные рекомендации для инженерного проектирования, отсутствуют.

Новизна настоящего исследования заключается в установлении количественной зависимости коэффициента отдачи тепла от соотношения расходов для конкретной конфигурации системы солнечного теплоснабжения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования

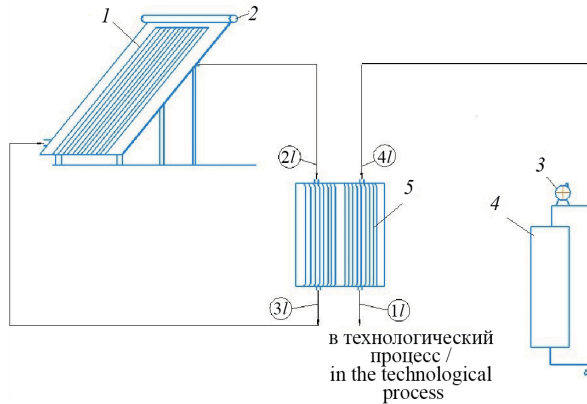
В качестве объекта исследования рассматривался процесс нагрева жидкости жидкостным теплоносителем в пластинчатом теплообменнике в зависимости от соотношения расходов первичного теплоносителя в гелиоколлекторе Q_{hc} и нагреваемой жидкости Q_r .

Материалы и оборудование

Эксперименты проводились в лаборатории кафедры технологий и оборудования производства и переработки продукции животноводства Агротехнологической академии. Была собрана лабораторная установка. Схема подключения датчиков температуры представлена на рисунке 1.

В теплообменник 5 подавалась вода, нагретая в гелиоколлекторе 1, а также продукт, подлежащий нагреву – молоко. Контур 1 (4I–1I) – часть трубопроводов системы, по которым движется молоко: продукт с постоянным входным расходом ($Q_i = \text{const}$) и начальной температурой 16–17 °С. Контур 2 (2I–3I) – часть трубопроводов системы, по которым движется теплоноситель – вода, предварительно нагретая в модуле гелионагрева, с переменным расходом Q_{hc} .

Общий вид экспериментальной установки и блок замера температур показан на рисунках 2–4.



Р и с. 1. Схема экспериментального стенда с указанием точек измерения температуры:

1 – гелиоколлектор; 2 – бак-аккумулятор нагретой воды; 3 – насос;
4 – накопитель проточной воды; 5 – пластинчатый теплообменник

F i g. 1. Experimental setup diagram with temperature measurement points:

1 – solar collector; 2 – heated water storage tank; 3 – pump; 4 – flow water storage tank;
5 – plate heat transfer unit

Примечание: 1l – выход нагреваемого продукта; 2l – вход теплоносителя; 3l – выход теплоносителя; 4l – вход нагреваемого продукта.

Note: 1l – heated product outlet; 2l – heat transfer fluid inlet; 3l – heat transfer fluid outlet; 4l – heated product inlet.

Источник: рисунок 1 составлен авторами статьи в программе КОМПАС-график.

Source: Figure 1 was compiled by the authors of the article in the program KOMPAS-Graphic.



Р и с. 2. Общий вид экспериментальной установки:

1 – бак-аккумулятор; 2 – гелиоколлектор; 3 – теплообменник

F i g. 2. General view of the experimental setup:

1 – accumulator tank; 2 – solar collector; 3 – heat transfer unit

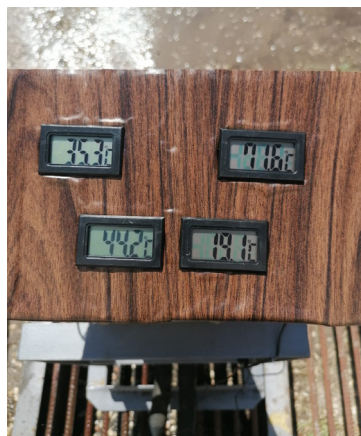
Источник: фотографии для рисунков 2–4 были сделаны в период проведения экспериментов 06.08.2025–11.08.2025 в павильоне механизации института «Агротехнологическая академия» Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского.

Source: The photos for figures 2–4 were taken during the period of the experiments (06.08.2025–08.11.2025), in the pavilion of mechanization of the Agrotechnological Academy, V. I. Vernadsky Crimean Federal University.



Р и с. 3. Соединение контура гелиоколлектора с теплообменником

F i g. 3. Connecting the solar collector circuit to the heat exchanger



Р и с. 4. Блок электронной регистрации температуры в точках подачи и выхода теплоносителя и нагреваемой жидкости

F i g. 4. Electronic temperature recording unit at the inlet and outlet of the heat transfer fluid and being heated liquid

Процедура исследования

В ходе эксперимента фиксировались температуры на входе и выходе обоих контуров (датчики 1/–4/). Серии экспериментов проводились в трех повторностях для трех фиксированных значений расхода продукта: $Q_{p1} = 3,5$ л/мин, $Q_{p2} = 4,25$ л/мин, $Q_{p3} = 5,0$ л/мин. В каждой серии варьировался расход теплоносителя Q_{hc} .

В качестве интегрального критерия эффективности теплообмена был принят коэффициент отдачи тепла k_o , рассчитываемый по формуле:

$$k_o = \frac{\Delta T_p}{\Delta T_{hc}} = \frac{T_1 - T_4}{T_2 - T_3},$$

где T_1 – температура продукта на выходе, °C; T_4 – температура продукта на входе, °C; T_2 – температура теплоносителя на входе, °C; T_3 – температура теплоносителя на выходе °C. Данный коэффициент характеризует долю реально переданной тепловой энергии по отношению к максимально возможной в идеальном случае. Данное выражение получено в результате рассмотрения частного случая – равенства правых частей уравнений теплового баланса для продукта:

$$Q_p = M_p c_p (T_{kp} - T_{np}),$$

где M_p – масса продукта, кг; c_p – теплоемкость продукта, Дж/(кг·K); T_{kp} , T_{np} – конечная и начальная температура продукта, °C.

Для теплоносителя:

$$Q_{hc} = M_{hc} c_{hc} (T_{khc} - T_{nhc}),$$

где M_{hc} – масса теплоносителя, кг; c_{hc} – теплоемкость теплоносителя, Дж/(кг·K); T_{khc} , T_{nhc} – конечная и начальная температуры теплоносителя, °C. В данном случае задача теплообмена рассмотрена для отношения разностей соответствующих температур.

Для расчета характеристик течения молока взяты исходные справочные характеристики. Плотность $\rho = 1\,030$ кг/м³; динамическая вязкость $\mu = 2,5 \cdot 10^{-3}$ Па·с; кинематическая вязкость $\nu = \mu/\rho = 2,43 \cdot 10^{-6}$ м²/с; теплопроводность $\lambda = 0,55$ Вт/(м·K); удельная теплоемкость $C_p = 3\,900$ Дж/(кг·K); коэффициент температуропроводности $\alpha = \lambda/(\rho C_p) = 1,37 \cdot 10^{-7}$ м²/с; коэффициент объемного расширения $\beta = 4,5 \cdot 10^{-4}$ K⁻¹.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Зависимость температурных параметров от расхода теплоносителя

Проведены шесть опытов при различных значениях температуры теплоносителя. С помощью температурных датчиков в каждом опыте замеряли значения температур продукта и теплоносителя на выходе и входе (рис. 4). Полученные в результате измерений сведены в таблицу 1.

Т а б л и ц а 1

Table 1

Зависимость температурного режима теплообменника от расхода теплоносителя в контуре гелионагрева для $Q_p = 5,0$ л/мин

Dependence of the heat transfer unit temperature on the heat transfer fluid flow rate in the heliothermy circuit $Q_p = 5.0$ L/min

№ датчика / № sensor	Вариант 1 / Option 1		Вариант 2 / Option 2		Вариант 3 / Option 3		Вариант 4 / Option 4		Вариант 5 / Option 5		Вариант 6 / Option 6	
	Q_{hc}^*	t^{**}	Q_{hc}	t	Q_{hc}	t	Q_{hc}	t	Q_{hc}	t	Q_{hc}	t
1	0,8	21,6	1,5	21,9	2,0	23,1	2,5	23,1	3,0	23,9	3,5	27,9
2	–	44,2	–	45,8	–	46,1	–	46,8	–	47,8	–	48,6
3	–	25,1	–	25,8	–	27,3	–	27,8	–	28,4	–	33,4
4	–	16,9	–	16,9	–	16,9	–	16,9	–	16,9	–	16,9

Источник: таблицы 1–4 составлены авторами статьи.

Source: The tables 1–4 were compiled by the authors of the article.

Примечание: *Расход, л/мин; **Температура, °C.

Note: *Consumption, L/min; **Temperature, °C.

Переменной величиной был расход теплоносителя Q_{hc} ; расход нагреваемого продукта оставался постоянным, $Q_p = 5,0$ л/мин.

Полученные замеры позволили определить температурный прирост нагреваемого продукта в теплообменнике ΔT_p , температурную разность, отданную теплоносителем ΔT_{hc} , и рассчитать коэффициент отдачи тепла в теплообменнике k_o (табл. 2).

Таблица 2

Table 2

Показатели эффективности работы теплообменника
Performance indicators of the heat transfer unit

№ варианта / № option	ΔT_p	ΔT_{hc}	k_o	$k_o, \%$
1	4,7	20,0	0,235	23,5
2	5,2	19,1	0,272	27,2
3	6,5	18,5	0,351	35,1
4	7,8	17,5	0,446	44,6
5	9,0	16,8	0,536	53,6
6	11,0	15,2	0,724	72,4

Расчеты основных показателей течения молока по трубам и секциям теплообменника при различных значениях скоростей с учетом исходных свойств молока дали следующие результаты (табл. 3).

Таблица 3

Table 3

Гидравлические характеристики перемещения молока в технологическом оборудовании
Hydraulic characteristics of milk movement in processing equipment

Скорость V_{tr} , м/с / Speed V_{tr} , m/s	Число Рейнольдса Re / The Reynolds number	Режим течения / Flow mode	Число Нуссельта Nu / The Nusselt number
0,2	4 115	Ламинарный / Laminar Flow	43,6
0,3	6 173	Переходный / Transitional	78,5
0,5	10 288	Начало Турбулентного / The Beginning of the Turbulent	109,0
0,8	16 461	Турбулентный / Turbulent	162,0
1,0	20 576	Турбулентный / Turbulent	190,0

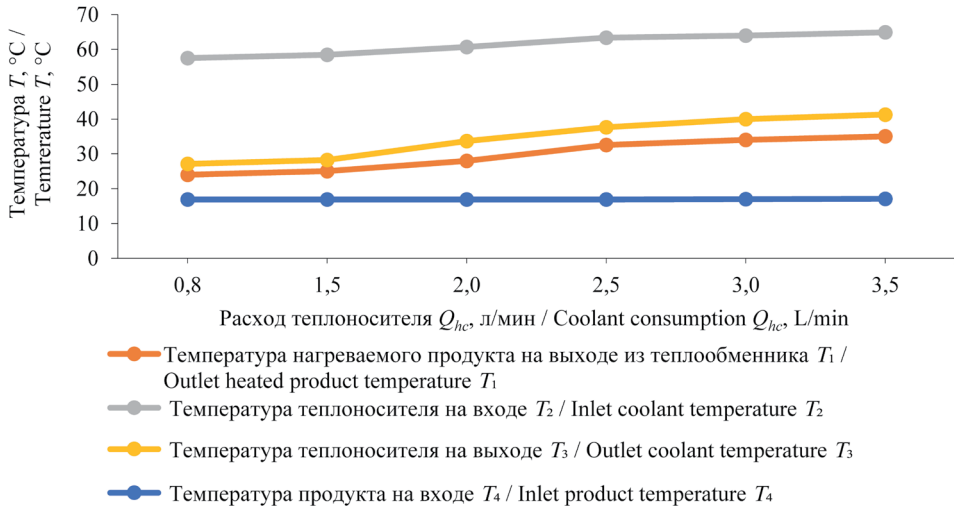
Данные показатели характерны для транспортировки молока. При движении в секциях теплообменника скорость перемещения составляет:

$$V_t = (0,5 \dots 0,6) V_{tr},$$

где V_t – скорость движения молока в теплообменнике, м/с; V_{tr} – допустимая скорость транспортировки молока для условий, указанных в таблице, м/с.

Характер движения молока в данном случае находится в рамках переходного режима, так как число Рейнольдса находится в пределах: $2\,300 < Re < 10^4$.

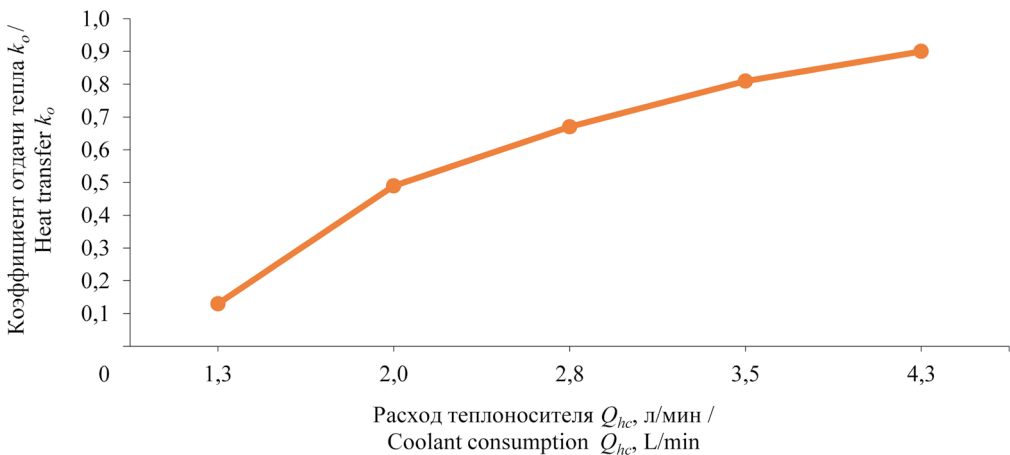
По полученным результатам построены графики зависимости температурных значений от расхода теплоносителя (рис. 5).



Р и с. 5. Зависимость температуры компонентов теплообмена от расхода теплоносителя
 F i g. 5. Dependence of the temperature of heat exchange components on the heat transfer fluid flow rate

Источники: графики для рисунков 5, 6 составлены авторами статьи в программе Microsoft Excel.
 Source: The graphs for figures 5, 6 were compiled by the authors of the article in the Microsoft Excel.

Эффективность исследуемого процесса оценивалась коэффициентом отдачи тепла k_o . Нелинейная зависимость коэффициента от величины расхода теплоносителя показана на рисунке 6.



Р и с. 6. Зависимость коэффициента отдачи тепла от расхода теплоносителя при $Q_{hc} = 3,59$ л/мин
 F i g. 6. Dependence of the heat transfer coefficient on the heat transfer fluid flow rate for $Q_{hc} = 3.59$ L/min

На начальном участке (Q_{hc} в пределах 1,3–2,0 л/мин) наблюдается интенсивный рост k_o . Далее эффективность продолжает расти, но темпы роста замедляются. При достижении значений Q_{hc} около 3,5 л/мин и выше кривая выходит

на стабилизацию, и в дальнейшем наблюдается гораздо менее динамичный рост, повышение расхода теплоносителя не приводит к существенному повышению k_o .

Влияние соотношения расходов на эффективность теплообмена

Для обобщения результатов был введен безразмерный параметр, отражающий динамику теплообменника – соотношение расходов Q_{hc}/Q_p (табл. 4).

Таблица 4

Table 4

Значения коэффициента отдачи тепла в зависимости от соотношения Q_{hc}/Q_p

Values of the heat transfer coefficient depending on the Q_{hc}/Q_p ratio

Вариант / Option	Q_{hc} , л/мин / Q_{hc} , L/min	Q_{hc}/Q_p	k_o , %
$Q_p = 3,50$ л/мин / $Q_p = 3.50$ L/min			
1	0,80	0,23	23,6
2	1,25	0,36	24,4
3	2,00	0,57	28,4
4	2,75	0,78	54,7
5	3,50	1,00	76,8
6	4,25	1,20	78,6
$Q_p = 4,25$ л/мин / $Q_p = 4.25$ L/min			
1	0,80	0,19	12,1
2	1,25	0,29	49,8
3	2,00	0,47	65,1
4	2,75	0,65	75,0
5	3,50	0,82	90,3
6	4,25	1,00	88,6
$Q_p = 5,00$ л/мин / $Q_p = 5.00$ L/min			
1	0,80	0,16	23,5
2	1,25	0,25	27,2
3	2,00	0,40	35,1
4	2,75	0,55	44,6
5	3,50	0,70	53,6
6	4,25	0,85	72,4

В таблице 4 представлена зависимость значений коэффициента отдачи тепла k_o от соотношения расходов для всех проведенных экспериментов.

ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ полученных экспериментальных данных показал устойчивую зависимость: с ростом расхода теплоносителя Q_{hc} при постоянном значении расхода продукта Q_p температура нагреваемого продукта на выходе T_1 повышается. Например, при значении $Q_p = 3,5$ л/мин увеличение Q_{hc} с 0,8 до 3,5 л/мин привело к росту температуры продукта на выходе T_1 с 23,9 до 35,0 °С. При значении $Q_p = 5,0$ л/мин увеличении Q_{hc} с 0,8 до 3,5 л/мин привело к росту температуры нагреваемого продукта на выходе T_1 с 21,6 до 27,9 °С.

Аналогичная тенденция наблюдалась во всех сериях опытов. Это объясняется увеличением количества теплоты, переносимой в единицу времени через стенку пластинчатого теплообменника.

Согласно полученным данным, прирост температуры продукта в проведенных опытах изменялся от 4,7 до 11,0 °С (табл. 2). Рост величины ΔT_p является прямым следствием увеличения эффективности теплопередачи, что и отражается в росте k_o , %.

Разность температур теплоносителя ΔT_{hc} снижается с 20,0 до 15,2 °С, из чего следует, что эффективность использования потенциала теплоносителя снижается при чрезмерном увеличении расхода нагреваемого продукта. Снижение ΔT_{hc} означает, что теплоноситель отдает меньше тепловой энергии в теплообменнике.

По результатам проведенных исследований пластинчатый теплообменник показал возможность функционирования в широком диапазоне эффективности – от 23,5 до 72,4 %. Это означает, что правильная настройка расхода теплоносителя является ключевой для обеспечения его эффективной работы.

Данные эксперимента позволяют выбрать оптимальный режим работы, находящийся в области высоких значений k_o . Например, при расходе продукта 4,25 л/мин значение коэффициента достигало 90 % (табл. 3).

Наглядно подтверждается фундаментальный принцип теплообмена – его эффективность напрямую зависит от режима течения жидкостей, который регулируется их расходами. Так как в данном случае производился нагрев молока, необходимо указать на технологические особенности процесса. Технологические ограничения по характеру течения молока в теплообменнике следующие: необходимость полноты приема тепла (нагрева) – это минимизирует скорость; предотвращение осаждения и пригорания – ограничение по минимуму скорости; предотвращение расслоения молока на фракции – ограничение по максимуму скорости.

Рекомендуемые нормативные значения скорости перемещения молока и молочных продуктов по трубам следующие:

- оптимальный диапазон для цельного молока – 0,25–1,2 м/с;
- критический максимум (для коротких участков) – 1,5 м/с;
- минимальная скорость для предотвращения пригорания осаждения – 0,2 м/с.

Для обезжиренного молока допустимы более высокие скорости: 1–2 м/с. В этом случае риск расслоения меньше из-за сниженного содержания жира.

Технологические последствия превышения скорости перемещения молока ($V > 1,5$ м/с) имеют негативные эффекты. Наблюдается расслоение жировой фазы (образование сливочного слоя, неравномерное распределение жира, ухудшение органолептических свойств); механическая деструкция (разрушение жировых шариков, активация липазы (окислительная порча), повышение кислотности). Кроме того, наблюдается аэрация продукта (насыщение кислородом, развитие окислительных процессов, потеря витаминов).

Если молочное сырье идет на производство структурированных молочных продуктов (сметана, йогурт, кефир), то скорость перемещения на нижнем пределе рекомендуется до 0,3 м/с. Следовательно, режим течения молока – ламинарный – начало переходного. Если сырье идет в дальнейшем на сепарирование с целью

разделения на сливки и обезжиренное молоко, скорость перемещения может быть увеличена до 0,8 м/с без риска потери свойств сырья при транспортировке и качества конечного продукта. Этот режим можно характеризовать как начало турбулентного.

Согласно требованиям международных стандартов IDF (International Dairy Federation) рекомендует максимальную скорость 1,0–1,2 м/с, EHEDG (European Hygienic Engineering) – $\leq 1,2$ м/с для эмульсий. По требованиям национальных стандартов ГОСТ Р 52090-2003⁷, СанПиН 2.3.4.551-96⁸ максимальные значения перемещения молока составляют 1,0 – 1,5 м/с.

На основании расчетов, проведенных по исходным характеристикам продукта, можно выделить зону оптимального соотношения расходов $Q_{hc}/Q_p = 0,75...0,95$. В этом диапазоне обеспечивается высокий коэффициент отдачи тепла ($k_o > 75\%$), что свидетельствует об эффективном использовании температурного потенциала теплоносителя, а также обеспечивается режим течения продукта, отвечающий условиям IDF, EHEDG, требованиям национальных стандартов. Эксперимент показал, что увеличение расхода продукта выше расхода теплоносителя ведет к снижению эффективности: 90 % при расходе продукта 4,25 л/мин и 72 % при расходе 5,0 л/мин. Работа при меньших соотношениях (например, $Q_{hc}/Q_p < 0,5$) является неэффективной, так как значительная часть тепловой энергии теплоносителя не передается нагреваемой жидкости и возвращается в гелиоколлектор.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате экспериментальных исследований установлены количественные зависимости температуры нагреваемой жидкости на выходе пластинчатого теплообменника от расхода и температуры теплоносителя, поступающего из солнечного коллектора. При постоянной температуре подаваемого на нагрев продукта на входе в указанный диапазон изменения температуры теплоносителя возрастает значение температуры нагретого продукта на выходе из теплообменника. Прослеживается корреляция динамики изменения температуры теплоносителя на входе и выходе из установки с изменением температуры продукта. Максимальное сближение температур нагреваемого продукта и теплоносителя на выходе отражает повышение эффективности теплообмена.

Установлена и проанализирована зависимость коэффициента отдачи тепла k_o для конфигурации системы «гелиоколлектор + пластинчатый теплообменник» от безразмерного параметра – соотношения расходов Q_{hc}/Q_p . Выявлено, что эффективность теплообмена возрастает при увеличении Q_{hc}/Q_p до 0,95, после чего рост замедляется и выходит на плато при $Q_{hc}/Q_p > 0,95$.

Полученные данные дают основание рекомендовать для практического применения оптимальное соотношение расходов теплоносителя и нагреваемой

⁷ ГОСТ Р 52090-2003. Молоко питьевое и напиток молочный. Технические условия. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200032512> (дата обращения: 04.08.2025).

⁸ СанПиН 2.3.4.551-96. Предприятия пищевой и перерабатывающей промышленности (технологические процессы. Сырье). Производство молока и молочных продуктов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200006398> (дата обращения: 04.08.2025).

жидкости в диапазоне $Q_{hc}/Q_p = 0,75...0,95$. Реализация данного режима позволяет достичь коэффициента отдачи тепла k_o свыше 75 % при минимизации энергозатрат на транспортировку теплоносителя. Подтверждена технологическая возможность и эффективность использования солнечной энергии для нагрева воды через пластинчатый теплообменник, что позволяет существенно снизить потребление традиционных энергоносителей. Перспективы дальнейших исследований связаны с изучением влияния типа и геометрии пластин теплообменника на эффективность, а также с интеграцией полученных данных в математическую модель для оптимизации работы всей системы солнечного теплоснабжения в динамических режимах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бутузов В.А. Солнечное теплоснабжение в России. *Промышленная энергетика*. 2015;(2):59–62. <https://elibrary.ru/ngcwh>
2. Бутузов В.А. Солнечное теплоснабжение в регионах России. *Энергосбережение*. 2014;(6):76–79. URL: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=5914 (дата обращения: 17.11.2025).
3. Ильина Т.Н., Саввин Н.Ю., Сотникова О.А., Суслов Д.Ю., Модифицированный пластинчатый теплообменный аппарат. *Сантехника, отопление, кондиционирование*. 2025;(5):35–37. URL: <https://www.c-o-k.ru/articles/modificirovannyi-plastinchatyy-teploobmennyy-apparat> (дата обращения: 17.11.2025).
4. Сухоцкий А.Б. Энергетическая эффективность пластинчатых теплообменников систем теплоснабжения. *Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика*. 2024;(1):46–59. URL: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=8630&ysclid=mqxmsu32a25926459 (дата обращения: 15.09.2025).
5. Филиппов С.П. Переход к углеродно-нейтральной экономике: возможности и пределы, актуальные задачи. *Теплоэнергетика*. 2024;(1):21–40. <https://doi.org/10.56304/S004036362401003X>
6. Ильин Р.А., Шишкин Н.Д. Комплексная оценка эффективности и создание экспериментальной солнечной водонагревательной установки. *Альтернативная энергетика и экология*. 2015;(21):14–19. <https://doi.org/10.15518/isjaec.2015.21.001>
7. Ковалёв О.П., Ильин А.К., Ильин Р.А. Исследование теплоотдачи при ламинарном течении жидкостей в трубе. *Вестник Астраханского государственного технического университета*. 2011;(3):121–125. <https://elibrary.ru/onjarb>
8. Ковалёв О.П., Ильин А.К. Математическая модель управления процессом контактного тепло-массообмена и экспериментальная проверка ее адекватности. *Вестник Астраханского государственного технического университета*. 2012;(2):81–84. <https://elibrary.ru/noyhpд>
9. Агафонова И.В., Мурашко М.М. Интенсификация процесса теплообмена в аппаратах пластинчатого типа за счет оптимизации геометрического профиля пластин на примере инновационных решений изготовителя. *Энергосбережение и водоподготовка*. 2023;(2):44–49. URL: https://www.energija.ru/2023_02_contents/ (дата обращения: 08.12.2025).
10. Гербер Ю.Б., Гаврилов А.В., Киян Н.С. Моделирование процесса тепловой обработки жидких продуктов в пластинчатом теплообменнике с использованием комплексной энергозамещающей установки. *Инженерные технологии и системы*. 2020;30(2):200–218. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202002.200-218>
11. Гербер Ю.Б. Определение критерия пастеризации для пластинчатой установки с использованием комплексного энергозамещающего устройства (КЭУ). *Вестник Сумского национального аграрного университета. Серия: экономика и менеджмент*. 2013;(10):110–112. <https://elibrary.ru/smmaur>

12. Никулин Н.Ю. Исследование теплообмена в интенсифицированном кожухотрубном аппарате. *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова*. 2019;(4):77–82. https://doi.org/10.34031/article_5cb1e65e6c0d28.53980880
13. Семенов И.Е., Платонов Н.И. Исследование теплообмена в контактном аппарате с пленочными форсунками. *Вестник южно-уральского государственного университета. Серия: энергетика*. 2008;(26):10–14. URL: <https://www.powervestniksusu.ru/index.php/PVS/article/view/56> (дата обращения: 08.12.2025).
14. Arsenyeva O.P., Tovazhnyanskyy L.L., Kapustenko P.O., Demirskiy O.V. Generalised Semi-Empirical Correlation for Heat Transfer in Channels of Plate Heat Exchanger. *Applied Thermal Engineering*. 2014;(70):1208–1215. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.04.038>
15. Arsenyeva O.P., Čuček L., Tovazhnyanskyy L.L., Kapustenko P.O., Savchenko Y.A., Kusakov S.K., et al. Utilisation of Waste Heat from Exhaust Gases of Drying Process. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*. 2016;(10):131–138. <https://doi.org/10.1007/s11705-016-1560-8>
16. Garelli L., Ríos G., Dorella J.J., Storti M.A. Heat Transfer Enhancement in Panel Type Radiators Using Delta-Wing Vortex Generators. *International Journal of Thermal Sciences*. 2018;(137):64–74. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.10.037>
17. Goedecke R., Scholl S. Modelling and Simulation of a Pillow Plate Thermosiphon Reboiler. *Heat and Mass Transfer*. 2019;(55):95–104. <https://doi.org/10.1007/s00231-018-02543-4>
18. Kong D., Zhang Y., Liu S. Convective Heat Transfer Enhancement by Novel Honeycomb-Core in Sandwich Panel Exchanger Fabricated by Additive Manufacturing. *Applied Thermal Engineering*. 2019;(163):114408. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114408>
19. Klemeš J.J., Varbanov P.S., Kapustenko P.O. New Developments in Heat Integration and Intensification, Including Total Site, Waste-to-Energy, Supply Chains and Fundamental Concepts. *Applied Thermal Engineering*. 2013;61(1):1–6. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.05.003>
20. Kapustenko P., Arsenyeva O., Dolgonosova O. The Heat and Momentum Transfers Relation in Channels of Plate Heat Exchangers. *Chemical Engineering Transactions*. 2011;(25):357–362. <https://doi.org/10.3303/CET1125060>
21. Tran J.M., Piper M., Kenig E.Y. Single-Phase Flow and Condensation in Pillow-Plate Condensers. In: *Innovative Heat Exchangers*. Cham: Springer International Publishing AG; 2019. 247–266 pp. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-71641-1>
22. El-Maktoume D., Chesneau X., Diallo A., Randriamanantany Z.A. Study of Habitat's Thermal Performance Equipped with an Adsorption Cooling Unit by Geothermal Heat Pump. *Journal of Power and Energy Engineering*. 2021;9(8):26–52. <https://doi.org/10.4236/jpee.2021.98003>

REFERENCES

1. Butuzov V.A. [Solar Heat Supply in the Regions of Russia]. *Energoberezhenie*. 2014;(6):76–79. (In Russ.) Available at: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=5914 (accessed 19.04.2025).
2. Butuzov V.A. [Solar Heating in Russia]. *Industrial Power Engineering*. 2015;(2):59–62. (In Russ.) <https://elibrary.ru/tngcwh>
3. Ilyina T.N., Savvin N.Yu., Sotnikova O.A., Suslov D.Yu. Modified Plate Heat Exchanger. *Plumbing, Heating, Air-Conditioning*. 2025;(5):35–37. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://www.c-o-k.ru/articles/modificirovannyy-plastinchatyy-teploobmennyy-apparat> (accessed 19.04.2025).
4. Suhotskiy A.B. Energy Efficiency of Plate Heat Exchangers in Heating Systems. *AVOK*. 2024;(1):46–59. Available at: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=8630&ysclid=mxqtxmsu32a25926459 (accessed 15.09.2025).
5. Filippov S.P. [Transition to a Carbon Neutral Economy: Opportunities and Limits, Current Challenges]. *Thermal Power Engineering*. 2024;(1):21–40. (In Russ.) <https://doi.org/10.56304/S004036362401003X>
6. Ilyin R.A., Shishkin N.D. The Comprehensive Assessment of the Efficiency and the Creation of the Experimental Solar Water Heating Unit. *Alternative Energy and Ecology*. 2015;(21):14–19. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15518/isjaec.2015.21.001>

7. Kovalev O.P., Ilyin A.K., Ilyin R.A. Investigation of Heat Exchange at the Laminar Flow of Liquids in the Pipe. *Vestnik of Astrakhan State Technical University*. 2011;(3):121–125. <https://elibrary.ru/onjarb>
8. Kovalev O.P., Ilyin A.K. Mathematical Model of Management of the Process of Contact Heat and Mass Exchange and Experimental Check of its Adequacy. *Vestnik of Astrakhan State Technical University*. 2012;(2):81–84. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/noyhpdp>
9. Agafonova I.V., Murashko M.M. Intensification of the Heat Transfer Process in Plate-Type Apparatuses by Optimizing the Geometric Profile of the Plates on the Example of the Manufacturer's Innovative Solutions. *Ėnergobereženie i vodopodgotovka*. 2023;(2):44–49. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: https://www.energija.ru/2023_02_contents/ (accessed 08.12.2025).
10. Gerber Yu.B., Gavrilov A.V., Kiyani N.S. Modeling the Process of Thermal Treatment of Liquid Products in a Plate Heat Exchanger Using an Integrated Energy-Substituting Installation. *Engineering Technologies and Systems*. 2020;30(2):200–218. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202002.200-218>
11. Gerber Y.B. Pasteurization Criteriy Determination for Plate Device with the Integrated Equipment. *Journal Bulletin of Sumy National Agrarian University. Series: Economics and Management*. 2013;(10):110–112. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/smmaur>
12. Nikulin N. The Study of Heat Transfer in Intensified Shell and Tube Device. *Bulletin of Belgorod State Technological University Named After. V. G. Shukhov*. 2019;(4):77–82. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.34031/article_5cb1e65e6c0d28.53980880
13. Semenov V.P., Platonov N.I. The Analysis of Heat Transform in a Contact Film Jet Apparatus. *Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering*. 2008;(26):10–14. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://www.powervestniksus.ru/index.php/PVS/article/view/56> (accessed 08.12.2025).
14. Arsenyeva O.P., Tovazhnyanskyy L.L., Kapustenko P.O., Demirskiy O.V. Generalised Semi-Empirical Correlation for Heat Transfer in Channels of Plate Heat Exchanger. *Applied Thermal Engineering*. 2014;(70):1208–1215. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.04.038>
15. Arsenyeva O.P., Čuček L., Tovazhnyanskyy L.L., Kapustenko P.O., Savchenko Y.A., Kusakov S.K., et al. Utilisation of Waste Heat from Exhaust Gases of Drying Process. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*. 2016;(10):131–138. <https://doi.org/10.1007/s11705-016-1560-8>
16. Garelli L., Ríos G., Dorella J.J., Storti M.A. Heat Transfer Enhancement in Panel Type Radiators Using Delta-Wing Vortex Generators. *International Journal of Thermal Sciences*. 2018;(137):64–74. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.10.037>
17. Goedecke R., Scholl S. Modelling and Simulation of a Pillow Plate Thermosiphon Reboiler. *Heat and Mass Transfer*. 2019;(55):95–104. <https://doi.org/10.1007/s00231-018-02543-4>
18. Kong D., Zhang Y., Liu S. Convective Heat Transfer Enhancement by Novel Honeycomb-Core in Sandwich Panel Exchanger Fabricated by Additive Manufacturing. *Applied Thermal Engineering*. 2019;(163):114408. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114408>
19. Klemeš J.J., Varbanov P.S., Kapustenko P.O. New Developments in Heat Integration and Intensification, Including Total Site, Waste-to-Energy, Supply Chains and Fundamental Concepts. *Applied Thermal Engineering*. 2013;61(1):1–6. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.05.003>
20. Kapustenko P., Arsenyeva O., Dolgonosova O. The Heat and Momentum Transfers Relation in Channels of Plate Heat Exchangers. *Chemical Engineering Transactions*. 2011;(25):357–362. <https://doi.org/10.3303/CET1125060>
21. Tran J.M., Piper M., Kenig E.Y. Single-Phase Flow and Condensation in Pillow-Plate Condensers. In: *Innovative Heat Exchangers*. Cham: Springer International Publishing AG; 2019. 247–266 pp. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-71641-1>
22. El-Maktoume D., Chesneau X., Diallo A., Randriamanantany Z.A. Study of Habitat's Thermal Performance Equipped with an Adsorption Cooling Unit by Geothermal Heat Pump. *Journal of Power and Energy Engineering*. 2021;9(8):26–52. <https://doi.org/10.4236/jpee.2021.98003>

Об авторах:

Гербер Юрий Борисович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии и оборудования производства и переработки продукции животноводства Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского (295007, Российская Федерация, г. Симферополь, просп. Академика Вернадского, д. 4), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3224-6833>, Researcher ID: B-6690-2019, gerber_1961@mail.ru

Вербицкий Алексей Петрович, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и оборудования производства и переработки продукции животноводства Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского (295007, Российская Федерация, г. Симферополь, просп. Академика Вернадского, д. 4), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8578-1288>, aleksey195883@mail.ru

Вклад авторов:

Ю. Б. Гербер – контроль, лидерство и наставничество в процессе планирования и проведения исследования, формулирование идеи исследования, целей и задач, валидация результатов, написание рукописи – рецензирование и редактирование.

А. П. Вербицкий – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов, сбор данных, формальный анализ, проверка воспроизводимости результатов экспериментов и исследования в рамках основных или дополнительных задач работы.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 29.10.2025; поступила после рецензирования 22.01.2026;
принята к публикации 09.02.2026*

About authors

Yuri B. Gerber, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Technology and Equipment for Production and Processing of Livestock Products, V. I. Vernadsky Crimean Federal University (4 Vernansky Ave., Simferopol 295007, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3224-6833>, Researcher ID: B-6690-2019, gerber_1961@mail.ru

Alexey P. Verbitsky, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Technology and Equipment for the Production and Processing of Livestock Products, V. I. Vernadsky Crimean Federal University (4 Vernansky Ave., Simferopol 295007, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8578-1288>, aleksey195883@mail.ru

Authors contribution:

Yu. B. Gerber – oversight and leadership responsibility for the research activity planning and execution, including mentorship external to the core team, ideas; formulation or evolution of overarching research goals and aims, validation, writing – review and editing.

A. P. Verbitsky – conducting a research and investigation process, specifically performing the experiments, evidence collection, formal analysis, verification, whether as a part of the activity or separate, of the overall replication / reproducibility of results / experiments and other research outputs.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 29.10.2025; revised 22.01.2026; accepted 09.02.2026

**ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ /
ELECTRICAL TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT**<https://doi.org/10.15507/2658-4123.26363.595-617>EDN: <https://elibrary.ru/tdzhex>

УДК / UDK 621.372.873.3:581.192.7:633.521

*Оригинальная статья / Original article***Повышение посевных качеств семян
льна-долгунца при обработке в магнитном
градиентном поле постоянного тока****И. В. Юдаев¹✉, А. А. Акимов², С. С. Скворцов²,
Н. Н. Иванютина², А. И. Беленков³, И. О. Плотницкий⁴**¹*Кубанский государственный аграрный университет
имени И. Т. Трубилина,**г. Краснодар, Российская Федерация, <https://ror.org/058jafb94>*²*Тверская государственная сельскохозяйственная академия,
г. Тверь, Российская Федерация, <https://ror.org/021lwq19>*³*Федеральный научный центр кормопроизводства
и агроэкологии имени В. Р. Вильямса,**г. Лобня, Российская Федерация*⁴*ООО Объединение инноваций,
г. Москва, Российская Федерация*✉ etsh1965@mail.ru*Аннотация*

Введение. Стратегической целью ведения эффективного землепользования при возделывании технических культур является необходимость повышения их урожайности с сохранением качества получаемого сырья, что возможно реализовать, начав с подготовки качественного семенного материала.

Цель исследования. Экспериментально оценить влияние предпосевной обработки семян льна-долгунца магнитным градиентным полем постоянного тока на их рост, развитие и продуктивность.

Материалы и методы. В качестве объекта выбраны семена льна-долгунца. Для изменения параметров режимов градиентной магнитной предпосевной обработки использована специализированная лабораторная установка, позволяющая изменять параметры градиентного магнитного поля в следующем диапазоне: индукция магнитного поля внутри рабочей камеры – от 0,83 до 8,00 мТл, сила тока в обмотках – от 0,2 до 2,0 А, напряжение питания – от 2,5 до 25 В. Обработка семян и исследования на всхожесть и энергию прорастания осуществлялись в лабораторных условиях. Полевые опыты проводились на опытном участке, почва которого имела следующие характеристики: дерново-среднеподзолистая легкосуглинистая остаточной карбонатной глееватая

© Юдаев И.В., Акимов А.А., Скворцов С.С., Иванютина Н.Н., Беленков А.И., Плотницкий И.О., 2026

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

на морене, характеризуется гумусом – 1,6 %; подвижным фосфором P_2O_5 – 345 мг/кг; обменным калием K_2O – 85 мг/кг; pH_{KCl} – 5,03; мощностью пахотного слоя – 20–22 см. **Результаты исследования.** Энергия прорастания обработанных семян увеличилась в среднем на 11,4 %, а лабораторная всхожесть – на 14,8 %. Подтвердилась положительная реакция семян на обработку – общая выживаемость растений льна-долгунца на отдельных вариантах увеличилась с 22,9 (контроль) до 35,6 %. Зафиксировано увеличение урожайности льнотресты с 25,6 (контроль) до 51,8 ц/га и льносемян – с 6,6 (контроль) до 12,6 ц/га. Поскольку лен-долгунец возделывался на семенные цели, был определен коэффициент размножения. На отдельных вариантах он равнялся 32, 33 и 37 ед., по сравнению с 17 ед. на контроле.

Заключение. Наилучшая отзывчивость семян льна (всхожесть, энергия роста, выживаемость и др.) зафиксирована при их обработке в магнитном поле с индукцией 5,81; 6,70 и 7,35 мТл. Такие параметры магнитопрайминга позволяют технически просто и экономически выгодно организовать обработку семян и их пятидневную отлежку в местах непосредственного складского хранения с последующим высевом в почву. Дальнейшие исследования могут быть направлены на проведение многолетних наблюдений, что позволит подготовить рекомендации по применению этого агротехнического приема для внедрения в организации и хозяйства, которые занимаются семеноводством и интенсивным выращиванием льна-долгунца.

Ключевые слова: предпосевная стимуляция семян, градиентное магнитное поле, семена льна-долгунца, параметры и режимы обработки, индукция магнитного поля, всхожесть семян, энергия роста, структура урожая

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Юдаев И.В., Акимов А.А., Скворцов С.С., Иванютина Н.Н., Беленков А.И., Плотницкий И.О. Повышение посевных качеств семян льна-долгунца при обработке в магнитном градиентном поле постоянного тока. *Инженерные технологии и системы*. 2026;36(3):595–617. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.26363.595-617>

Improving the Sowing Qualities of Fibre Flax Seeds Treated in a Direct Current Magnetic Gradient Field

I. V. Yudaev^a✉, A. A. Akimov^b, S. S. Skvortsov^b,
N. N. Ivanyutina^b, A. I. Belenkov^c, I. O. Plotnitsky^d

^aI. T. Trubilin Kuban State Agricultural University,
Krasnodar, Russian Federation, <https://ror.org/058jafb94>

^bTver State Agricultural Academy,
Tver, Russian Federation, <https://ror.org/0211wgq19>

^cFederal Williams Research Center of Forage Production
and Agroecology,

Lobnya, Russian Federation

^dООО «Association of Innovations»,

Moscow, Russian Federation

✉ etsh1965@mail.ru

Abstract

Introduction. The strategic objective of efficient land management in cultivating industrial crops is the increase of their yield while maintaining the quality of the raw materials obtained that can be achieved if prepare high-quality seed material.

Aim of the Study. The study is aimed at determining experimentally the effect of pre-sowing treatment of fibre flax seeds in a direct current magnetic gradient field on their growth, development and productivity.

Materials and Methods. The study object was fibre flax seeds. To vary the parameters of the gradient magnetic pre-sowing treatment modes, there was used a specialized laboratory setup, which allows adjusting the gradient magnetic field parameters within the following ranges: magnetic field induction inside the working chamber – from 0.83 to 8.00 mT, current in the windings – from 0.2 to 2.0 A, and supply voltage – from 2.5 to 25 V. Seed treatment and studies germination ability and germination energy were carried out under laboratory conditions. The field experiments were conducted on an experimental plot, the soil of which was soddy-medium-podzolic light loamy residual carbonate gleyic on moraine with content – 1.6%; labile phosphorus P_2O_5 – 345 mg/kg, exchangeable potassium K_2O – 85 mg/kg; pH_{KCl} – 5.03; thickness of the arable layer – 20–22 cm.

Results. The germination energy of the treated seeds increased on average by 11.4%, and laboratory germination – by 14.8%. The results of field studies confirmed the positive response of seeds to the treatment – the overall survival of fibre flax plants in certain variants increased from 22.9% (control) to 35.6%. There has been recorded that the fibre flax straw yield increased from 25.6 (control) to 51.8 c/ha, and flax seed yield – from 6.6 (control) to 12.6 c/ha. Since fibre flax was cultivated for seeds, there has been determined the multiplication coefficient. In certain variants, it was 32, 33 and 37 units, compared to 17 units in the control.

Conclusion. The best response of flax seeds (germination, growth energy, etc.) was recorded after treating in a magnetic field with an induction of 5.81, 6.70 and 7.35 mT. These magnetopriming parameters make possible a technically simple and cost-effective treatment of seeds and their five-day warehouse storage followed by sowing into the soil. Further research may be aimed at conducting long-term observations that will allow preparing recommendations for using this agricultural method at agricultural organizations and farms involved in seed production and intensive cultivation of fiber flax.

Keywords: pre-sowing stimulation of seeds, gradient magnetic field, fiber flax seeds, treatment parameters and modes, magnetic field induction, seed germination, growth energy, yield structure

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

For citation: Yudaev I.V., Akimov A.A., Skvortsov S.S., Ivanyutina N.N., Belenkov A.I., Plotnitsky I.O. Improving the Sowing Qualities of Fibre Flax Seeds Treated in a Direct Current Magnetic Gradient Field. *Engineering Technologies and Systems*. 2026;36(3):595–617. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.26363.595-617>

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время Российская Федерация обладает существенным потенциалом для производства нишевых культур, среди которых выделяется важная для народного хозяйства техническая культура – лен-долгунец, волокно из которого имеет наиболее высокую прочность по сравнению с хлопковым.

Посевные площади в России несколько утратили свои показатели не только по сравнению с 1990 годом, но и с 1913 и 1938 годами. Так, в 1913 году площадь посевов составляла 1 020 тыс. га, в 1938 – 2 500 тыс. га, в 1990 – 418 тыс. га, в 2000 – 108 тыс. га, а в 2015 и 2020 – только 53 тыс. га. Российские производители льна также отмечают, что в настоящее время не удастся собрать планируемый урожай из семян отечественной селекции, в то время как семена льна французской

и бельгийской селекции оказываются более продуктивными. Поэтому восстановление производства льна в Российской Федерации является актуальной задачей для аграрного сектора отдельных регионов страны [1].

Технология возделывания льна характеризуется низкой негативной экологической и антропогенной нагрузкой на окружающее пространство: агротехника предполагает применение незначительного количества удобрений и пестицидов, а получаемая продукция почти полностью перерабатывается, оставляя минимум отходов [2].

При подготовке семян льна к посеву важным этапом является их протравливание и инкрустирование. С учетом экологических требований рекомендуется применять протравители – «Витавакс», «Фенорам», ТМТД и биопрепараты «Агат 25» и «Экост 1ГФ». Всероссийский научно-исследовательский институт льна рекомендует проводить инкрустирования совместно с применением микроудобрений – борной кислоты, молибденовокислого аммония, сернокислого цинка [3].

В сельском хозяйстве предпринимаются попытки поиска эффективных, малозатратных и экологически чистых технологий [4], которые могут повысить всхожесть, увеличить энергию прорастания и урожайность за счет обработки семян физическими воздействиями, в первую очередь, электромагнитной природы: электрическим полем [5]; низкочастотным электромагнитным полем [6]; импульсным электрическим полем [7].

Цель исследования заключается в определении эффективности магнитного градиентного поля постоянного тока, как агротехнологического приема для предпосевной обработки семян льна-долгунца. Для достижения поставленной цели необходимо: изучить влияние режимов обработки в магнитном градиентном поле постоянного тока и параметров этого поля на всхожесть и энергию роста семян льна-долгунца в лабораторных условиях; исследовать рост и развитие растений льна-долгунца, полученных из семян, обработанных в магнитном поле, в течение всего периода их онтогенеза.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В условиях своего естественного произрастания растения подвергаются постоянному магнитному воздействию из-за наличия у планеты собственного геомагнитного поля. Его интенсивность колеблется от значения менее 30 мкТл на большей части территорий Южной Америки и Африки до значения почти 70 мкТл на территориях около магнитных полюсов, на севере Канады и юге Австралии, а также частично на территории Сибири [8]. Коллектив авторов из Нижнего Новгорода совместно с исследователем из Израиля предполагают, что магнитное поле может воздействовать на эффективность подстройки физиологических процессов растений, а также на их адаптацию к стрессовым и изменяющимся условиям. В результате может проявляться «защитный» эффект – «повышение выживаемости растений в стрессовых условиях при изменении интенсивности магнитных полей» [9].

Анализ результатов экспериментальных исследований с аргументированным обоснованием влияния магнитного поля на развитие растений предполагал проявление ауксин-подобного эффекта (магнитотропизма) от воздействия магнитного

поля на прорастающие семена [10]. Интенсивно и разносторонне изучается влияние искусственно созданного магнитного поля на растительные объекты. Его воздействие проявляется в виде стимулирующего эффекта, определяемого в виде различных физиологических реакций со стороны растений и их семян, к которым, в первую очередь, относят: прорастание семян, время цветения, фотосинтез, изменение биомассы, активацию криптохрома, рост и развитие побегов.

Отчеты по проведенным исследованиям свидетельствуют о том, что растения демонстрируют опережающий рост и развитие в ответ на воздействие внешних магнитных полей [11; 12]. Семена сладкого перца (*Capsicum Annuum L.*), подвергнутые воздействию магнитного поля интенсивностью 57–60 мТл, показали повышенную скорость прорастания и увеличенный процент нормально проросших семян с более интенсивным и ускоренным темпом роста, а также улучшением качества плодов, которые характеризовались высоким содержанием фосфора и витамина С [11]. Полевые исследования на основе кратковременной предварительной обработки семян магнитным полем интенсивностью 5–15 мТл и длительностью 5–15 минут показали увеличение всхожести, роста и урожайности растений пшеницы (*Triticum Aestivum L.*) [12].

В то же время проростки ячменя (*Hordeum Vulgare L.*), выращенные в магнитном поле с интенсивностью 10 мТл, характеризовались снижением сырой массы побегов на 12 % и корней на 35 %, а также сухой массы побегов на 19 % и корней на 48 % по сравнению с контрольными образцами, выращенными в условиях их естественного произрастания. По результатам был сделан вывод, что магнитное поле с очень низкой интенсивностью способно задерживать как формирование, так и развитие органов растения¹.

Улучшение параметров прорастания семян, роста и развития растений исследователи объясняют повышенным поглощением питательных веществ. Наблюдалось, что применение магнитного поля влияет непосредственно на мембраны семян, приводя последние к повышению их проницаемости с уменьшением утечки заряженных ионов во время набухания [13]. Также было обнаружено, что липидный компонент клеточной мембраны значительно усиливается в семенах томата (*Solanum Lycopersicum L.*) после применения внешнего магнитного поля интенсивностью 126 и 208 мТл. Это повышает проницаемость мембраны [14] и, в конечном итоге, приводит к перемещению питательных веществ внутрь клеток через каналы мембран. Таким образом, взаимодействие искусственно созданного магнитного поля с мембранной системой растительного объекта может быть ключевым фактором в контроле физиологических реакций растений.

Учеными из Греции была проведена серия экспериментов по обработке в статическом магнитном поле семян овощных культур: томата (*Solanum Lycopersicum L.*), салата (*Lactuca L.*) и руколы (*Eruca SATIVA L.*) [15]. Рассада томата лучше развивалась из семян, обработанных в магнитном поле с индукцией 45 мТл и временем воздействия 60 и 90 мин по сравнению с контролем. Для улучшения роста рассады руколы магнитная индукция должна составлять 150 мТл. Результаты для семян

¹ Лебедев С.И., Баранский П.И., Литвиненко Л.Г., Шиян Л.Т. Рост ячменя в сверхслабом магнитном поле. *Электронная обработка материалов*. 1977;(3):71–73.

салата были противоречивыми, т. е. было неясно, следует ли применять более низкую (45 мТл) или более высокую (300 мТл) индукцию магнитного поля [15].

Изучалась возможность применения обработки в статическом магнитном поле семян льна (*Linum Usitatissimum L.*). Многофакторный эксперимент позволил определить энергию прорастания и всхожесть семян при различных энергетических дозах обработки на установке с постоянными магнитами. Было доказано, что оптимальными параметрами режима предпосевной обработки семян льна в магнитном поле являются: четырехкратное перемагничивание; магнитная индукция – 65 мТл; полюсное деление – 0,23 м; скорость перемещения семян – 0,4 м/с; доза энергии – 1,79 Дж·с/кг. При такой обработке энергия прорастания растений увеличилась на 30 %, всхожесть – на 2,6 %, длина стебля – на 10,5 %, урожайность соломы и семян – на 0,7 и 7,9 ц/га соответственно [16].

Положительное воздействие магнитного поля проявляется в увеличении: всхожести семян; длины корней и побегов; поглощении воды и CO_2 ; содержания фотосинтетических пигментов. Это способствует устойчивому ведению сельскохозяйственного производства даже в условиях абиотических стрессов [17–19]. Однако в отдельных случаях магнитное поле вызывало угнетение роста растений, и вышеупомянутые параметры ухудшились [20; 21].

Механизм, с помощью которого растения воспринимают магнитное поле и реагируют на его проявление, не изучен полностью [22]. Поэтому для повышения всхожести семян, увеличения урожайности и улучшения развития культуры дополнительно необходимо выявить правильное сочетание интенсивности и времени воздействия магнитного поля. Отдельного изучения требует вопрос влияния градиентного магнитного поля на предпосевную обработку семян, а также оценка ответной реакции, проявляющейся в виде изменения роста и развития растений, формирования урожая.

Градиентное магнитное поле – это, прежде всего, частный случай неоднородного магнитного поля, в котором магнитная индукция поля, его направление или то и другое одновременно изменяются в пространстве. Такое поле можно зафиксировать, например, вблизи постоянных магнитов, катушек индуктивности или в устройствах, использующих магнитные поля для управления движением частиц и др. Основной характеристикой создаваемого градиентного магнитного поля является его градиент – вектор, который показывает, как быстро и в каком направлении изменяется магнитная индукция.

Проведенные в России исследования по изучению влияния градиентного магнитного поля касались в основном обработки семян овощных, злаковых, масличных и других культур [23]. Так, экспериментальным путем был подтвержден положительный эффект обработки семян огурца (*Cucumis sativus L.*). Устойчивая стабильность магнитобиологических эффектов у проростков огурца была зафиксирована при скорости движения семян 1–2 м/с в магнитном поле, напряженность которого была в диапазоне значений 3 979–11 937 А/м. Сформировавшиеся растения в сравнении с контрольными образцами имели более высокую продуктивность процесса фотосинтеза и обладали большим числом женских цветков. Следовательно, урожайность в опытных вариантах увеличилась (на 7,6–15,3 %) [23].

Анализ проведенных исследований позволил сформировать общие закономерности положительного влияния магнитного поля на развитие семян сельскохозяйственных культур. К основным эффектам, способствующим повышению урожайности, относятся: увеличение всхожести; повышение устойчивости к стрессовым факторам (засуха, болезни); ускорение роста и развития растений, а также экологическая безопасность метода, так как рассматриваемый подход является экологически чистой технологией и служит альтернативой химическим обработкам.

На наш взгляд, градиентное магнитное поле эффективнее однородного вследствие того, что оно вносит пространственную неоднородность, которая превращает электромагнитное воздействие из окружающего растительного «фона» в активный фактор, способный:

- физически перемещать заряженные и нейтральные элементарные частицы – основу построения внутренней структуры семени за счет сил пропорциональных градиенту поля;
- инициировать квантовые переходы в спиновых системах, составляющих внутриклеточные основы построения растительных организмов, что особенно проявляется в структурированной воде, и запускать биохимические процессы;
- обеспечивать более полное и равномерное «пробуждение» метаболизма семени, что подтверждается ростом числа корешков, увеличением биомассы и повышенной урожайностью.

В качестве рабочей гипотезы можно предположить следующее: семя содержит сложные органические молекулы и воду, которая является диамагнетиком. Она слабо намагничивается в направлении, противоположном внешнему магнитному полю, из-за отсутствия неспаренных электронов. Это значит, что вода отталкивается магнитным полем, хотя этот эффект очень слаб и незаметен в обычных условиях. В градиентном поле на молекулы воды, входящие в состав семени, действует сила, «выталкивающая» их в сторону меньшей интенсивности магнитного поля. Это создает локальные градиенты давления и концентрации внутри клеток семени, что может служить триггером для активизации метаболизма.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования

Для изучения процесса предпосевной обработки в магнитном градиентном поле постоянного тока с целью стимуляции посевных качеств, роста, развития и продуктивности растений были выбраны семена льна-долгунца (*Linum usitatissimum* L.) сорта «Атлант», включенного в Госреестр по Северо-Западному региону.

Лен-долгунец сорта «Атлант» рекомендован для возделывания в Вологодской и Тверской областях. Стебель длинный. Точечность чашелистиков отсутствует или очень слабая. Венчик при полном развитии синий. Коробочка маленькая, бахромчатость ложной перегородки отсутствует. Семя темно-коричневое. Время начала цветения раннее. Вегетационный период составляет 87 дней. Высота растений – 79 см. Масса 1 000 семян – 4,9 г. Устойчивость к полеганию – 4,6 балла, а к осыпанию – 5,0 балла. Содержание волокна – 31,1 %, выход длинного волокна – 22,4 %,

относительная разрывная расчетная нагрузка (прочность) – 140,3 мН/текс. Сорт устойчив к фузариозному увяданию и ржавчине, а также к фузариозу. Средняя урожайность льносоломы составляет 46,5 ц/га, что на 0,9 ц/га выше стандарта. Урожайность семян на уровне стандарта – 4,6 ц/га.

Для посева использовались семена категории ОС (Маточная элита 2 года), обработанные согласно схеме опыта.

Методы исследования

Методология исследования включала комплекс лабораторных, полевых, инструментальных и статистических подходов. Исследования проводили в 2024 году в условиях лаборатории кафедры агрохимии, земледелия и лесопользования Тверской государственной сельскохозяйственной академии. Лабораторную всхожесть семян и их энергию прорастания определяли согласно ГОСТ 12038-84².

Полевой опыт закладывали на опытном участке Тверской государственной сельскохозяйственной академии на дерново-среднеподзолистой легкосуглинистой остаточной карбонатной глееватой на морене почве. Агрохимические показатели пахотного слоя почвы до закладки опыта были следующие: гумус (по Тюрину) – 1,6 %; подвижный фосфор P_2O_5 – 345 мг/кг, обменный калий K_2O – 85 мг/кг (по Кирсанову); pH_{KCl} – 5,03; мощность пахотного слоя – 20–22 см. Повторность опыта была четырехкратной, размещение вариантов – рендомизированным, площадь опытной делянки составляла 18 м².

Агротехника возделывания льна-долгунца соответствовала общепринятой для Тверской области, включая дискование, вспашку, культивацию, внесение минеральных удобрений (азофоска 3 ц/га), узкорядный посев с нормой высева 12 млн всхожих семян на 1 га, прикатывание, обработку гербицидами и сплошную уборку урожая. Инструментальные измерения включали определение параметров установки для магнитной обработки: общего сопротивления и индуктивности катушек (11,5 Ом и 0,059 Гн соответственно), силы тока (0,2–2,0 А), напряжения питания (2,5–25 В) и индукции магнитного поля внутри рабочей камеры (0,83–8,00 мТл), которую измеряли цифровым гауссметром GOYOJO GT129A.

Для создания градиентного магнитного поля использовалась специализированная установка с вертикальной цилиндрической камерой, основными и дополнительными согласно-встречно включенными обмотками, формирующими линейный аксиальный градиент.

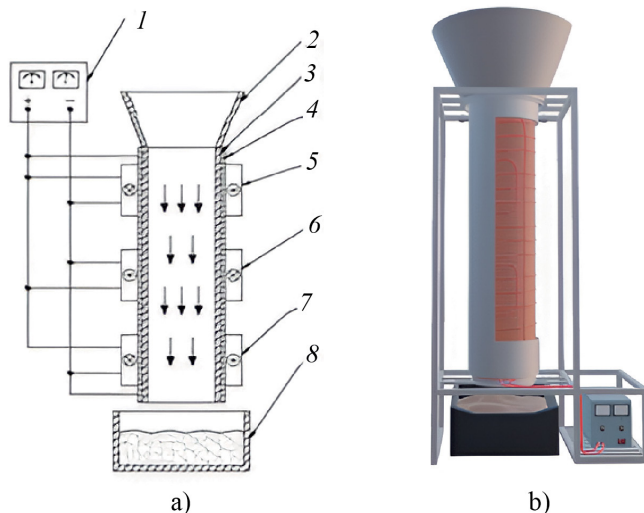
В ходе полевых экспериментов проводили морфометрические измерения: определяли высоту растений, техническую длину и толщину стебля, количество растений перед уборкой, число коробочек на одном растении, число семян в одной коробочке, массу семян с одной коробочки и массу 1 000 семян. Урожайность льнотресты и льносемян учитывали в ц/га с пересчетом на стандартную влажность. Качество волокна оценивали по содержанию волокна и его урожайности. Агрохимический анализ почвы включал определение содержания гумуса, подвижного фосфора и обменного калия, кислотности. Статистическую обработку экспериментальных данных проводили методом дисперсионного анализа с оценкой

² ГОСТ 12038-84. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200023365> (дата обращения: 14.08.2025).

наименьшей существенной разности (HCP_{05}) для подтверждения достоверности полученных результатов. Дополнительно рассчитывали коэффициент размножения как отношение полученного урожая семян к массе высеванных семян. Визуализация результатов исследований осуществлялась с использованием программ Microsoft Excel, nanoCAD и ZBrush.

Оборудование и процедура исследования

Семена льна-долгунца перед высевом предварительно подвергали обработке градиентным магнитным полем постоянного тока на специализированной установке (рис. 1)³.



Р и с. 1. Установка для предпосевной обработки семян льна в градиентном магнитном поле:

а) условная схема: 1 – источник постоянного тока; 2 – загрузочная воронка; 3 – основание; 4 – основная обмотка; 5 и 7 – согласно включенные дополнительные обмотки; 6 – встречно включенная дополнительная обмотка; 8 – приемный бункер; б) 3D-модель

F i g. 1. Installation for pre-sowing treatment of fiber flax seeds in a gradient magnetic field:
a) schematic diagram: 1 – direct current source; 2 – loading hopper; 3 – base; 4 – main winding; 5 and 7 – series-connected additional windings; 6 – counter-connected additional winding; 8 – receiving hopper; б) 3D model

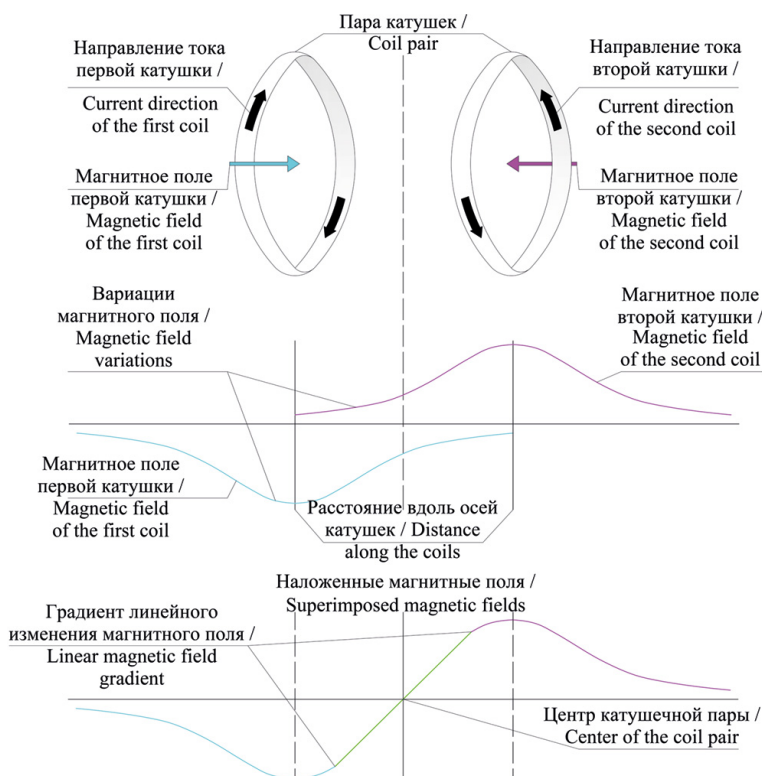
Источник: рисунки 1, 2 составлены авторами статьи в программах «nanoCAD» и «ZBrush».

Source: Figures 1, 2 were compiled by the authors of the article in the program «nanoCAD» and «ZBrush».

Установка для предпосевной обработки (рис. 1) семян льна-долгунца представляет собой конструкцию, состоящую из источника постоянного тока 1 с регулируемыми выходными параметрами – напряжением и током, а также из рабочего органа – рабочей камеры (активатора), в которой осуществляется обработка семян. Конструктивно камера изготовлена в виде вертикальной цилиндрической трубы-колонны с внутренней трубой-основанием из немагнитного материала 3, размещенными на ней обмотками 4–7 и внешнего защитного кожуха-корпуса из немагнитной нержавеющей стали. На внутренней трубе размещена основная

³ Кутис С.Д., Кутис Т.Л. Электромагнитные технологии в растениеводстве. Электромагнитная обработка семян и посадочного материала. М.: РИДРО; 2017. 76 с.

обмотка, на поверхности которой закреплены дополнительные обмотки 5–7, разнесенные по высоте рабочего органа, согласованно-встречно соединенные и размещенные в определенной пространственной последовательности. Между собой эти обмотки соединены таким образом, что, несмотря на протекающий по ним постоянный ток, создается меняющееся по длине колонны-трубы градиентное (аксиальное) магнитное поле [24]. Оно создается внутри и снаружи рабочего органа установки при помощи катушек, по которым протекает постоянный ток амплитуды в диапазоне от 0,2 до 2,0 А, но противоположного направления, что приводит к появлению магнитных полей разной полярности. При объединении изменяющихся магнитных полей образуется их линейное изменение между катушками, что формирует линейный градиент магнитного поля, например, как две катушки создают градиент, который является линейным только в середине (рис. 2).



Р и с. 2. Физический принцип формирования линейного градиента магнитного поля

F i g. 2. Physical principle of forming a linear magnetic field gradient

В классической схеме для создания линейного аксиального градиента чаще используют две катушки, однако три катушки также могут быть использованы в более сложной конфигурации, например, центральная катушка включена в одном направлении, а две крайние – в противоположном. Это позволяет увеличить область линейности градиента или получить более высокую эффективность при тех же габаритах.

Внутри вертикальной части (активатора) установки создается основное однородное магнитное поле, но поверх него за счет размещения на цилиндрической основной обмотке специальных градиентных катушек создается неоднородное магнитное поле (рис. 2). Создание градиентного поля в рабочей камере (активаторе) – это результат интерференции полей от нескольких специально спрофилированных и скоммутированных катушек, которые вместе создают суммарное поле, линейно меняющееся в нужном направлении.

Семена загружали в приемную воронку 2 и после свободного, самотечного перемещения они поступали в накопительную выгрузную емкость 8. Напряжение на установку подавалось от промышленно выпускаемого источника постоянного тока с регулируемыми параметрами – током и напряжением.

Сопоставили значения тока и напряжения измеренным значениям индукции магнитного поля, режимы которой для удобства проведения обработки были предварительно отгарированы в значениях амплитуды индукции магнитного поля, измеренной внутри рабочей камеры.

Перед началом исследований были проведены предварительные поверочные испытания установки, в результате которых определили следующие ее параметры и характеристики:

- общее сопротивление и индуктивность катушек равны 11,5 Ом и 0,059 Гн;
- индукция магнитного поля, измеренная внутри установки, составила диапазон значений от 0,83 до 8,0 мТл;
- сила тока для указанных значений индукции варьировалась от 0,2 до 2,0 А;
- напряжение питания, подаваемое на обмотки, изменялось от 2,5 до 25 В;
- характер изменения индукции магнитного поля на поверхности защитного кожуха рабочей камеры (активатора), который представлял собой объединение разнополярных отклонений магнитного поля отдельных пар градиентных катушек (рис. 3). Постоянный ток, протекающий по обмоткам установки, равен 0,6 А; 1,2 А; 1,8 А.

Повышать напряжение выше установленных значений не следует из-за выделения тепла нагреваемых обмоток, что изменяет параметры магнитного воздействия на семена (искажается чистота магнитной обработки), поэтому дополнительно необходимо комплектовать установку системой принудительного охлаждения.

Схема опыта, в соответствии с которым семена льна-долгунца были подвергнуты обработке, представлена в таблице 1.

Обработка почвы в осенний период заключалась в дисковании агрегатом МТЗ-82 с БДТ-3 и последующей вспашкой при появлении массовых всходов сорняков агрегатом МТЗ-82 с ПЛН-3-35. Весеннюю обработку проводили культивацией в два следа агрегатом Т-150 с КБМ-8. Минеральные удобрения вносились под предпосевную обработку, в норме – 3 ц/га азофоски (16:16:16). Предпосевную обработку почвы проводили агрегатом Т-150 с КБМ-8 в один след. Посев льна-долгунца осуществлялся 27 мая 2024 года агрегатом МТЗ-82 с СПУ-3 с нормой высева 12 млн. всхожих семян на 1 га узкорядным способом посева. После посева почву прикатывали агрегатом МТЗ-82 с ККЗ-6.



Р и с. 3. Распределение магнитной индукции на поверхности рабочего органа установки для обработки семян льна-долгунца в градиентном магнитном поле

Fig. 3. Distribution of magnetic induction on the surface of the working element of the installation for treatment of fiber flax seeds in a gradient magnetic field

Источник: рисунки 3–6 составлены авторами статьи в программе Microsoft Excel.

Source: Figures 3–6 were compiled by the authors of the article in the program Microsoft Excel.

Таблица 1

Table 1

Схема опыта обработки семян льна-долгунца в магнитном градиентном поле

Scheme of the experiment on treating fiber flax seeds in a magnetic gradient field

Вариант обработки / Treatment option	Вид обработки / Type of treatment
Контроль / Control	Без обработки в магнитном градиентном поле / Without magnetic gradient field treatment
Обработка в магнитном аксиальном градиентном поле с индукцией внутри рабочего пространства камеры / Treatment in a magnetic axial gradient field with induction in the central part inside the working space of the chamber	
Вариант 1 / Option 1	0,83 мТл
Вариант 2 / Option 2	1,68 мТл
Вариант 3 / Option 3	2,51 мТл
Вариант 4 / Option 4	3,34 мТл
Вариант 5 / Option 5	4,20 мТл
Вариант 6 / Option 6	5,04 мТл
Вариант 7 / Option 7	5,81 мТл
Вариант 8 / Option 8	6,70 мТл
Вариант 9 / Option 9	7,35 мТл
Вариант 10 / Option 10	8,00 мТл

Источник: таблицы 1–4 составлены авторами статьи.

Source: The tables 1–4 were compiled by the authors of the article.

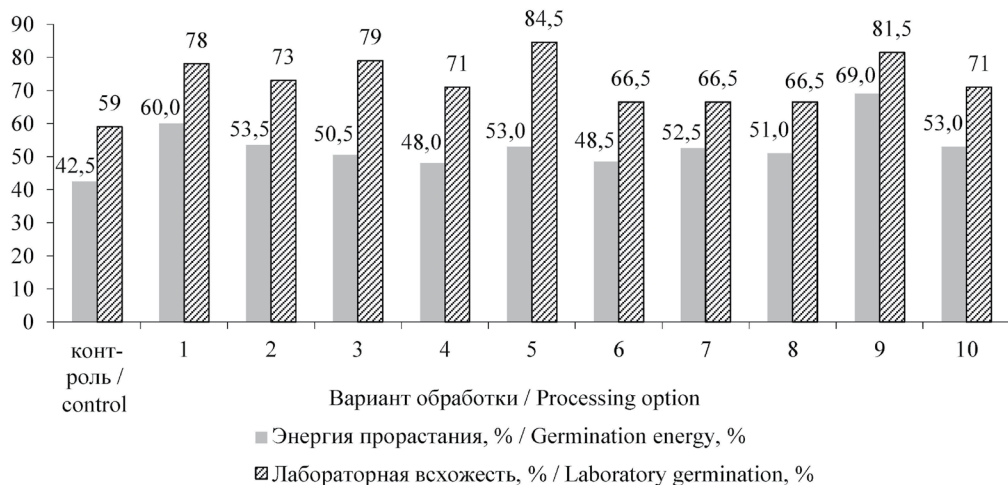
Применение против сорняков баковой смеси гербицидов Агритокс (1 л/га), Хантер (3 л/га), Секатор Турбо (0,1 л/га) проводилось в фазу «елочки» при высоте пырея ползучего 10–15 см опрыскивателем ЖУК вручную с нормой расхода рабочей жидкости 400 л/га. Уборка урожая осуществлялась 14 сентября 2024 года сплошным способом агрегатом МТЗ-82 с ЛК-5А.

Агрометеорологические условия при проведении исследований сильно отличались от средних многолетних значений. Неблагоприятные погодные условия в мае (аномально низкие температуры на фоне засушливых явлений) позволили провести сев только в конце месяца. Недостаточное влагообеспечение на фоне аномально высоких среднесуточных температур в первой декаде июня не позволили получить полноценные всходы культуры. В результате полевая всхожесть льна оказалась весьма низкой. На протяжении вегетации культуры отмечалось как недостаточное увлажнение (конец июня – начало июля), так и переувлажнение почвы в отдельные декады при достаточно высокой среднесуточной температуре воздуха в июне-июле.

Коэффициент размножения для льна-долгунца определяли в зависимости от изучаемых вариантов опыта обработки семян в магнитном градиентном поле как отношение массы собранных семян с единицы площади к массе высеванных семян (с учетом фактической нормы посева и массы 1 000 семян). Данный показатель позволяет оценить эффективность применения предпосевной магнитной обработки для семеноводческих целей.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

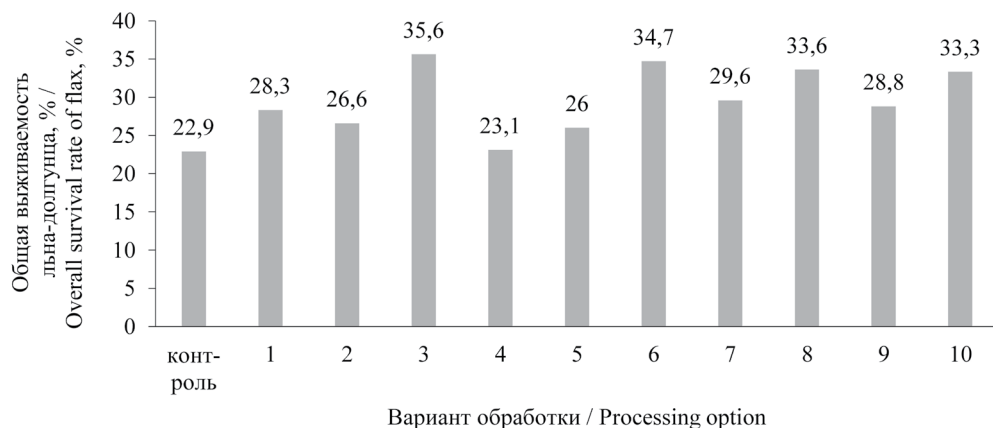
На рисунке 4 представлены гистограммы, характеризующие энергию прорастания и лабораторную всхожесть семян льна-долгунца в зависимости от вариантов их предпосевной обработки.



Р и с. 4. Влияние предпосевной обработки на энергию прорастания и лабораторную всхожесть семян льна-долгунца, 2024 год

F i g. 4. Effect of pre-sowing treatment on germination energy and laboratory germination of fiber flax seeds, 2024

На рисунке 5 представлены данные по общей выживаемости растений льна-долгунца в зависимости от изучаемых вариантов предпосевной обработки семян.



Р и с. 5. Влияние предпосевной обработки семян на общую выживаемость льна-долгунца
F i g. 5. Effect of pre-sowing seed treatment on overall survival of flax

Урожайность льна-долгунца (ц/га) в зависимости от приемов предпосевной обработки семян (2024 год) представлена в таблице 2.

Т а б л и ц а 2
T a b l e 2

Урожайность льна-долгунца (ц/га) в зависимости
от приемов предпосевной обработки семян, 2024 год
Fiber flax yield (c/ha) depending on pre-sowing seed treatment methods, 2024

Вариант обработки / Processing option	Урожайность, ц/га / Productivity, c/ha		Прибавка / Increase			
			ц/га / c/ha		%	
	тресты / trusts	семян / seeds	тресты / trusts	семян / seeds	тресты / trusts	семян / seeds
Контроль / Control	25,6	6,6	—	—	—	—
Вариант 1 / Option 1	41,2	10,5	15,6	3,9	60,9	59,1
Вариант 2 / Option 2	35,4	8,8	9,8	2,2	38,3	33,3
Вариант 3 / Option 3	45,9	11,0	20,3	4,4	79,3	66,7
Вариант 4 / Option 4	33,2	8,6	7,6	2,0	29,7	30,3
Вариант 5 / Option 5	55,3	12,6	29,7	6,0	116,0	90,9
Вариант 6 / Option 6	58,9	12,4	33,3	5,8	130,1	87,9
Вариант 7 / Option 7	50,0	14,1	24,4	7,5	95,3	113,6
Вариант 8 / Option 8	69,5	15,7	43,9	9,1	171,5	137,9
Вариант 9 / Option 9	66,9	16,6	41,3	10,0	161,3	151,5
Вариант 10 / Option 10	61,3	15,2	35,7	8,6	139,5	130,3
В среднем по вариантам обработки семян / Average by seed treatment options	51,8	12,6	26,2	6,0	102,2	90,2
НСР ₀₅	—	—	1,9	1,1	—	—

В таблице 3 приведена структура урожайности льна-долгунца (2024 год).

Т а б л и ц а 3

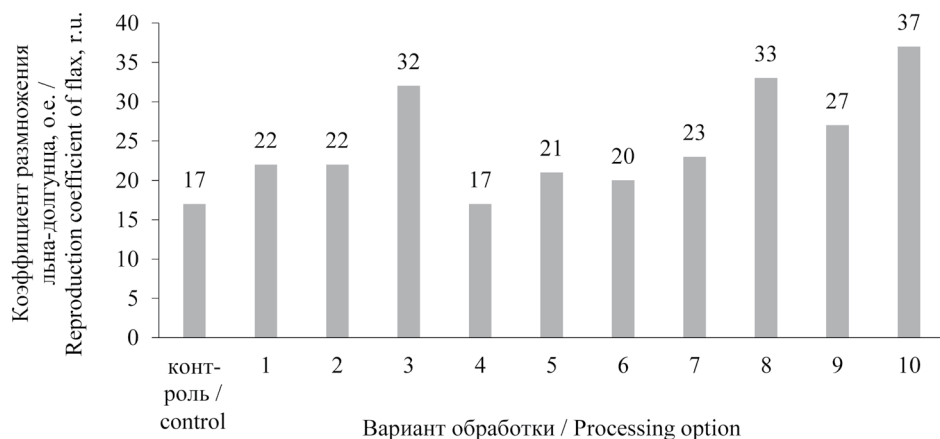
T a b l e 3

Структура урожайности льна-долгунца, 2024 год

Fiber flax yield structure, 2024

Вариант обработки / Treatment option	Количество растений перед уборкой, шт./м ² / Number of plants before harvesting, pcs/m ²	Число коробочек на одном растении, шт. / Number of boxes on one plant, pcs	Число семян в одной коробочке, шт. / Number of seeds in one box, pcs	Масса семян с одной коробочки, г / Weight of seeds per capsule, g	Масса 1 000 семян, г / Weight of 1,000 seeds, g
Контроль / Control	275	10,3	7,14	0,034	4,70
Вариант 1 / Option 1	340	10,6	7,33	0,034	4,77
Вариант 2 / Option 2	319	12,9	6,56	0,031	4,62
Вариант 3 / Option 3	427	12,7	7,11	0,035	4,95
Вариант 4 / Option 4	277	10,4	6,99	0,035	4,79
Вариант 5 / Option 5	312	12,2	6,65	0,030	4,62
Вариант 6 / Option 6	416	8,2	6,94	0,033	4,70
Вариант 7 / Option 7	355	16,5	4,78	0,022	4,42
Вариант 8 / Option 8	403	16,9	5,83	0,029	4,60
Вариант 9 / Option 9	346	15,0	6,16	0,031	5,10
Вариант 10 / Option 10	400	17,4	6,38	0,031	4,76
В среднем по вариантам обработки семян / Average by seed treatment options	360	13,3	6,47	0,031	4,73

На рисунке 6 представлено влияние предпосевной обработки семян на коэффициент размножения льна-долгунца (2024 год).



Р и с. 6. Влияние предпосевной обработки семян на коэффициент размножения льна-долгунца, 2024 год
F i g. 6. Effect of pre-sowing seed treatment on the multiplication factor of flax, 2024

В таблице 4 приведены данные о показателях качества волокна льна-долгунца.

Т а б л и ц а 4

T a b l e 4

Показатели качества волокна льна-долгунца, 2024 год
Fiber flax quality indicators, 2024

Вариант обработки / Treatment option	Высота растения, см / Plant height, cm	Техническая длина стебля, см / Technical length of stem, cm	Толщина стебля, мм / Stem thickness, mm	Содержание волокна, % / Fiber content, %	Урожайность волокна, ц/га / Fiber yield, c/ha
Контроль / Control	85,3	68,2	1,78	18,3	4,7
Вариант 1 / Option 1	98,8	81,7	1,86	18,4	7,6
Вариант 2 / Option 2	89,4	70,8	1,84	19,1	6,8
Вариант 3 / Option 3	104,1	85,4	1,95	14,3	6,6
Вариант 4 / Option 4	100,5	84,6	1,89	17,5	5,8
Вариант 5 / Option 5	102,1	84,1	1,98	16,3	9,0
Вариант 6 / Option 6	102,0	85,5	1,77	18,6	11,0
Вариант 7 / Option 7	106,3	84,4	2,16	19,3	9,7
Вариант 8 / Option 8	108,1	85,4	2,33	15,4	10,7
Вариант 9 / Option 9	105,5	85,6	2,09	16,3	10,9
Вариант 10 / Option 10	97,9	78,0	2,04	16,5	10,1
В среднем по вариантам обработки семян / Average by seed treatment options	101,5	82,6	1,99	17,2	8,8

Экспериментальные данные выявили влияние предпосевной обработки магнитным градиентным полем семян льна-долгунца на показатели роста, развития и продуктивности. Это позволяет перейти к обсуждению механизмов наблюдаемых эффектов и обоснованию оптимальных режимов обработки.

ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ результатов лабораторных исследований (рис. 4) показал, что энергия прорастания и всхожесть семян льна-долгунца были минимальными на контрольном варианте – 42,5 и 59,0 %. Применение вариантов обработки семян в магнитном градиентном поле позволило значительно повысить эти показатели с 42,5 до 69 % и с 59 до 84,5 % соответственно. Так, наибольшая энергия прорастания была получена на вариантах 1 и 9 – 60 и 69 %, а лабораторная всхожесть – на вариантах 5 и 9 – 84,5 и 81,5 %.

Таким образом, можно говорить о том, что предпосевная магнитная обработка семян льна-долгунца позволяет увеличить энергию прорастания семян в среднем на 11,4 %, а лабораторную всхожесть – на 14,8 %.

Наблюдение за ростом и развитием растений льна-долгунца показало, что в результате засушливых явлений в начале вегетации на фоне аномально высоких температур полевая всхожесть культуры была невысокой и находилась на уровне 50–55 %. В дальнейшем при нормализации погодных условий рост и развитие культуры можно охарактеризовать как вошедшие в норму. Лен прошел все фенологические фазы развития и закончил вегетацию в середине сентября.

Анализируя гистограммы рисунка 5, можно сделать заключение, что варианты предпосевной обработки семян в магнитном градиентном поле позволили увеличить общую выживаемость льна-долгунца с 22,9 до 35,6 % или, в среднем по вариантам, на 7,1 %. Наибольшая общая выживаемость была отмечена в вариантах 3 и 6 – 35,6 и 34,7 %, т. е. она возросла на 12,7 и 11,8 % соответственно.

Положительное влияние изучаемые варианты предпосевной обработки оказали и на формирование урожайности льна-долгунца (табл. 2). Без применения предпосевной обработки семян урожайность тресты составила 25,6 ц/га, а семян – 6,6 ц/га. Предпосевная магнитная обработка семян достоверно ($НСР_{05} = 1,9$ ц/га и $НСР_{05} = 1,1$ ц/га) увеличила урожайность льнотресты в среднем с 25,6 до 51,8 ц/га, а льносемян – с 6,6 до 12,6 ц/га или на 26,2 и 6,0 ц/га (102,2 и 90,2 %) соответственно. Среди изучаемых вариантов предпосевной обработки семян большую урожайность по обоим показателям обеспечивали варианты 8 и 9.

Разницу в урожайности как тресты, так и семян можно объяснить влиянием изучаемых приемов обработки семян в магнитном градиентном поле на основные элементы структуры урожая льна-долгунца (табл. 3). Количество растений перед уборкой, число коробочек на одном растении и масса 1 000 семян в среднем под воздействием изучаемых вариантов предпосевной обработки в магнитном градиентном поле возросли. При этом существенное влияние оказали изучаемые приемы на количество растений перед уборкой и число коробочек на одном растении, которые увеличились в среднем на 33,3 и 29,1 % соответственно. Действие изучаемых приемов на количество растений перед уборкой было более ярко выражено на 3-м и 6-м вариантах, число коробочек – с 7-го по 10-й вариант, масса 1 000 семян – 3-й и 9-й варианты.

Таким образом, изучение приемов предпосевной обработки семян показало большее их влияние на количество растений перед уборкой и число коробочек на одно растение.

Поскольку лен-долгунец возделывался на семенные цели, то был определен коэффициент размножения для данной культуры в зависимости от изучаемых вариантов опыта обработки семян в магнитном градиентном поле (рис. 6).

Изучаемые приемы предпосевной обработки семян приводят к увеличению коэффициента размножения с 17 до 37. При этом самые большие коэффициенты были получены на 3-м, 8-м и 10-м вариантах обработки (32, 33 и 37 ед.).

Высота растений под влиянием предпосевной обработки семян возрастает с 85,3 до 101,5 см, техническая длина стебля – с 68,2 до 82,6 см, толщина стебля – с 1,78 до 1,99 мм, урожайность волокна – с 4,7 до 8,8 ц/га (табл. 4).

Явного положительного влияния изучаемых вариантов обработки на содержание льноволокна не было выявлено. В то же время некоторое увеличение этого показателя (на 0,8 и 1,0 %) отмечалось на 2-м и 7-м вариантах. При определении урожайности волокна было зафиксировано положительное воздействие изучаемых вариантов обработки семян на его значение. Большая урожайность льноволокна получена на 6-м, 8-м и 9-м (11, 10,7 и 10,9 ц/га) вариантах обработки, что выше, чем на контрольном варианте в 2,34 – 2,28 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной вклад работы заключается в экспериментальном обосновании эффективности применения аксиального градиентного магнитного поля постоянного тока для предпосевной обработки семян льна-долгунца. Впервые показано, что пространственная неоднородность поля с линейным градиентом индукции в диапазоне 0,83–8,0 мТл обеспечивает более выраженный стимулирующий эффект по сравнению с известными аналогами. Это подтверждается увеличением энергии прорастания на 11,4 %, лабораторной всхожести на 14,8 %, а также кратным ростом урожайности до 2,3 раза. Установлены оптимальные режимы обработки 5,81 и 6,70 мТл, при которых достигается максимальный коэффициент размножения семян до 37 единиц против 17 в контроле.

Предложенная технология является экологически безопасной, поскольку исключает применение химических стимуляторов и протравителей для активации метаболизма семян, малозатратной и технологичной, так как реализуется на компактной установке с регулируемыми параметрами. Она обеспечивает стабильный прирост урожайности даже в неблагоприятные по погодным условиям годы, что подтверждает повышение адаптивного потенциала растений после обработки, а также позволяет существенно увеличить выход товарного волокна до 11,0 ц/га и улучшить воспроизводство семенного материала.

Перспективы дальнейших исследований связаны с изучением молекулярно-биологических механизмов воздействия градиентного магнитного поля на мембранные структуры и ферментативные системы семян, включая оценку активности пероксидазы, содержания аденозинтрифосфатов и изменения спектра жирных кислот. Необходимо также оптимизировать конструкцию установки для промышленной реализации, разработать проточные магнитные активаторы с автоматическим контролем режимов и системой охлаждения, провести многофакторные полевые эксперименты в различных почвенно-климатических зонах возделывания льна-долгунца для уточнения зональных рекомендаций по режимам обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рожмина Т.А., Павлова Л.Н., Понажев В.П., Захарова Л.М. Льянная отрасль на пути к возрождению. *Защита и карантин растений*. 2018;(1):3–8. <https://elibrary.ru/ynmxfe>
2. Басова Н.В., Новиков Э.В., Безбабченко А.В. Производство и переработка лубяных культур в России как элемент импортозамещения. *АПК: экономика, управление*. 2022;(8):71–78. <https://doi.org/10.33305/228-71>
3. Акимов А.А., Иванютина Н.Н., Васильев А.С., Дроздов И.А., Фаринюк Ю.Т., Зайцев С.С. Приемы повышения продуктивности сортовых посевов льна-долгунца при выращивании на залежных землях. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2019;(12):206–211. <https://doi.org/10.17513/mjpf.12981>
4. Baev V.I., Yudaev I.V., Petrukhin V.A., Baev I.V., Prokofev P.V., Armanyanov N.K. Electrotechnology as One of the Most Advanced Branches in the Agricultural Production Development. In: Handbook of Research on Renewable Energy and Electric Resources for Sustainable Rural Development. Hershey: IGI Global; 2018. pp. 149–175. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-3867-7.ch007>
5. Kazakova A.S., Yudaev I.V., Fedoischenko M.G., Mayboroda S.Yu., Ksenz N.V., Voronin S.M. New Approach to Study Stimulating Effect of the Pre-Sowing Barley Seeds Treatment in the Electromagnetic Field. *OnLine Journal of Biological Sciences*. 2018;18(2):197–207. <https://doi.org/10.3844/ojbsci.2018.197.207>
6. Дорохов А.С., Чаплыгин М.Е., Аксенов А.Г., Шибряева Л.С., Блинов Н.Д., Чулков А.С. и др. Обработка семян зерновых культур в низкочастотном электромагнитном поле. *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023;17(4):4–11. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-4-4-11>
7. Хайновский В.И., Копылова О.С., Козырев А.Е. Расчет доз воздействия импульсного электрического поля на семенной материал. *Аграрная Россия*. 2012;(9):37–40. <https://doi.org/10.30906/1999-5636-2012-9-37-40>
8. Finlay C.C., Maus S., Beggan C.D., Bondar T.N., Chambodut A., Chernova T.A., et al. International Geomagnetic Reference Field: the Eleventh Generation. *Geophysical Journal International*. 2010;183(3):1216–1230. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04804.x>
9. Grinberg M., Mudrilova M., Kozlova E., Sukhova V., Sarafanova F., Evtushenko A. Effect of Extremely Low-Frequency Magnetic Fields on Light-Induced Electric Reactions in Wheat. *Plant Signaling & Behavior*. 2022;17(1):e2021664. <https://doi.org/10.1080/15592324.2021.2021664>
10. Maffei M.E. Magnetic Field Effects on Plant Growth, Development, and Evolution. *Frontiers in Plant Science*. 2014;(5):445. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00445>
11. Ahamed M.E.M., Elzaawely A.A., Bayoumi Y.A. Effect of Magnetic Field on Seed Germination, Growth and Yield of Sweet Pepper (*Capsicum annuum* L.). *Asian Journal of Crop Science*. 2013;5(3):286–294. <https://doi.org/10.3923/ajcs.2013.286.294>
12. Hussain M.S., Dastgeer G., Afzal A.M., Hussain S., Kanwar R.R. Eco-Friendly Magnetic Field Treatment to Enhance Wheat Yield and Seed Germination Growth. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*. 2020;14:100299. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2020.100299>
13. Vashisth A., Nagarajan S. Exposure of Seeds to Static Magnetic Field Enhances Germination and Early Growth Characteristics in Chickpea (*Cicer Arietinum* L.). *Bioelectromagnetics*. 2008;29(7):571–578. <https://doi.org/10.1002/bem.20426>
14. Poinapen D., Toppozini L., Dies H., Brown D.C.W., Rheinstädter M.C. Static Magnetic Fields Enhance Lipid Order in Native Plant Plasma Membrane. *Soft Matter*. 2013;(9):6804–6813. <https://doi.org/10.1039/c3sm50355k>
15. Koukounaras A., Boursianis A., Kostas S., Theopoulos A., Bantis F., Samaras T. Pre-Sowing Static Magnetic Field Treatment of Vegetable Seeds and Its Effect on Germination and Young Seedlings Development. *Seeds*. 2023;2(4):394–405. <https://doi.org/10.3390/seeds2040030>
16. Savchenko V., Synyavsky O. Energy Dose of Flax Seed Treatment in a Magnetic Field. *Energy and Automation*. 2022;59(1). <https://doi.org/10.31548/energiya2022.01.005>
17. Efthimiadou A., Katsenios N., Karkanis A., Papastylianou P., Triantafyllidis V., Travlos I., et al. Effects of Presowing Pulsed Electromagnetic Treatment of Tomato Seed on Growth, Yield, and Lycopene Content. *The Scientific World Journal*. 2014;(1):369745 <https://doi.org/10.1155/2014/369745>

18. Menegatti R.D., de Oliveira L.O., Costa A.V.L., Braga E.J.B., Bianchi B.J. Magnetic Field and Gibberelic Acid as Pre-Germination Treatments of Passion Fruit Seeds. *Revista Ciência Agrícola*. 2019;17(1):15–22. <https://doi.org/10.28998/rca.v17i1.6522>
19. Bezerra E.A., Carvalho C.P.S., Costa Filho R.N., Silva A.F.B., Alam M., Sales M.V., et al. Static Magnetic Field Promotes Faster Germination and Increases Germination Rate of Calotropis Procera Seeds Stimulating Cellular Metabolism. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 2023;49(1):102650. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2023.102650>
20. Xia X., Pagano A., Macovei A., Padula G., Balestrazzi A., Hołubowicz R. Magnetic Field Treatment on Horticultural and Agricultural Crops: its Benefits and Challenges. *Folia Horticulturae*. 2024;36(1):67–80. <https://doi.org/10.2478/fhort-2024-0004>
21. Sari M.E., Demir I., Yildirim K., Memis N. Magnetopriming Enhance Germination and Seedling Growth Parameters of Onion and Lettuce Seeds. *International Journal of Agriculture, Environment and Food Sciences*. 2023;7(3):468–475. <https://doi.org/10.31015/jaefs.2023.3.1>
22. Sarraf M., Kataria S., Taimourya H., Santos L.O., Menegatti R.D., Jain M., et al. Magnetic Field (MF) Applications in Plants: An Overview. *Plants*. 2020;9(9):1139. <https://doi.org/10.3390/plants9091139>
23. Антипкина Л.А., Левин В.И., Борычев С.Н., Симдянкин А.А., Каширин Д.Е. Использование градиентного магнитного поля в предпосевной обработке семян огурца. *АгроЭкоИнфо*. 2022;(1):25. <https://doi.org/10.51419/202121123>
24. Yudaev I.V., Akimov A.A., Belenkov A.I., Plotnitsky I.O. Influence of Pre-Sowing Seed Treatment in a Magnetic Gradient Field on Growth, Development and Productivity of Long-Staple Flax. In: BIO Web of Conferences: International Scientific and Practical Conference “Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources” (FIES 2024). Kazan: EDP Sciences; 2025. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202516100062>

REFERENCES

1. Rozhmina T.A., Pavlova L.N., Ponazhev V.P., Zakharova L.M. Linen Industry on the Way to Revival. *Plant Protection and Quarantine*. 2018;(1):3–8. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/ynmxfe>
2. Basova N.V., Novikov E.V., Bezbabchenko A.V. Production and Processing of Bast Crops in Russia as an Element of Import Substitution. *AIC: Economics, Management*. 2022;(8):71–78. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.33305/228-71>
3. Akimov A.A., Ivanyutina N.N., Vasiliev A.S., Drozdov I.A., Farinyuk Yu.T., Zaytsev S.S. Productivity Methods Increasing of Flax Varieties at Grown on Fallow Lands. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2019;(12):206–211. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.17513/mjpf.12981>
4. Baev V.I., Yudaev I.V., Petrukhin V.A., Baev I.V., Prokofev P.V., Armyanov N.K. Electrotechnology as One of the Most Advanced Branches in the Agricultural Production Development. In: Handbook of Research on Renewable Energy and Electric Resources for Sustainable Rural Development. Hershey: IGI Global; 2018. pp. 149–175. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-3867-7.ch007>
5. Kazakova A.S., Yudaev I.V., Fedoischenko M.G., Mayboroda S.Yu., Ksenz N.V., Voronin S.M. New Approach to Study Stimulating Effect of the Pre-Sowing Barley Seeds Treatment in the Electromagnetic Field. *Online Journal of Biological Sciences*. 2018;18(2):197–207. <https://doi.org/10.3844/ojbsci.2018.197.207>
6. Dorokhov A.S., Chaplygin M.E., Aksenov A.G., Shibryaeva L.S., Blinov N.D., Chulkov A.S., et al. Grain Seed Treatment by a Low-Frequency Electromagnetic Field. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023;17(4):4–11. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-4-4-11>
7. Khainovsky V.I., Kopylova O.S., Kozyrev A.E. Calculation of the Doses of Pulsed Electric Field on Seed Material. *Agrarnaya Rossiya*. 2012;(9):37–40. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.30906/1999-5636-2012-9-37-40>
8. Finlay C.C., Maus S., Beggan C.D., Bondar T.N., Chambodut A., Chernova T.A., et al. International Geomagnetic Reference Field: the Eleventh Generation. *Geophysical Journal International*. 2010;183(3):1216–1230. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04804.x>

9. Grinberg M., Mudrilova M., Kozlova E., Sukhova V., Sarafanova F., Evtushenko A. Effect of Extremely Low-Frequency Magnetic Fields on Light-Induced Electric Reactions in Wheat. *Plant Signaling & Behavior*. 2022;17(1):e2021664. <https://doi.org/10.1080/15592324.2021.2021664>
10. Maffei M.E. Magnetic Field Effects on Plant Growth, Development, and Evolution. *Frontiers in Plant Science*. 2014;(5):445. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00445>
11. Ahamed M.E.M., Elzaawely A.A., Bayoumi Y.A. Effect of Magnetic Field on Seed Germination, Growth and Yield of Sweet Pepper (*Capsicum annuum* L.). *Asian Journal of Crop Science*. 2013;5(3):286–294. <https://doi.org/10.3923/ajcs.2013.286.294>
12. Hussain M.S., Dastgeer G., Afzal A.M., Hussain S., Kanwar R.R. Eco-Friendly Magnetic Field Treatment to Enhance Wheat Yield and Seed Germination Growth. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*. 2020;14:100299. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2020.100299>
13. Vashisth A., Nagarajan S. Exposure of Seeds to Static Magnetic Field Enhances Germination and Early Growth Characteristics in Chickpea (*Cicer Arietinum* L.). *Bioelectromagnetics*. 2008;29(7):571–578. <https://doi.org/10.1002/bem.20426>
14. Poinapen D., Toppozini L., Dies H., Brown D.C.W., Rheinstädter M.C. Static Magnetic Fields Enhance Lipid Order in Native Plant Plasma Membrane. *Soft Matter*. 2013;(9):6804–6813. <https://doi.org/10.1039/c3sm50355k>
15. Koukounaras A., Boursianis A., Kostas S., Theopoulos A., Bantis F., Samaras T. Pre-Sowing Static Magnetic Field Treatment of Vegetable Seeds and Its Effect on Germination and Young Seedlings Development. *Seeds*. 2023;2(4):394–405. <https://doi.org/10.3390/seeds2040030>
16. Savchenko V., Synyavsky O. Energy Dose of Flax Seed Treatment in a Magnetic Field. *Energy and Automation*. 2022;59(1). <https://doi.org/10.31548/energiya2022.01.005>
17. Efthimiadou A., Katsenios N., Karkanis A., Papastylianou P., Triantafyllidis V., Travlos I., et al. Effects of Presowing Pulsed Electromagnetic Treatment of Tomato Seed on Growth, Yield, and Lycopene Content. *The Scientific World Journal*. 2014;(1):369745 <https://doi.org/10.1155/2014/369745>
18. Menegatti R.D., de Oliveira L.O., Costa A.V.L., Braga E.J.B., Bianchi B.J. Magnetic Field and Gibberelic Acid as Pre-Germination Treatments of Passion Fruit Seeds. *Revista Ciência Agrícola*. 2019;17(1):15–22. <https://doi.org/10.28998/rca.v17i1.6522>
19. Bezerra E.A., Carvalho C.P.S., Costa Filho R.N., Silva A.F.B., Alam M., Sales M.V., et al. Static Magnetic Field Promotes Faster Germination and Increases Germination Rate of Calotropis Procera Seeds Stimulating Cellular Metabolism. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 2023;49(1):102650. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2023.102650>
20. Xia X., Pagano A., Macovei A., Padula G., Balestrazzi A., Hołubowicz R. Magnetic Field Treatment on Horticultural and Agricultural Crops: its Benefits and Challenges. *Folia Horticulturae*. 2024;36(1):67–80. <https://doi.org/10.2478/fhort-2024-0004>
21. Sari M.E., Demir I., Yildirim K., Memis N. Magnetopriming Enhance Germination and Seedling Growth Parameters of Onion and Lettuce Seeds. *International Journal of Agriculture, Environment and Food Sciences*. 2023;7(3):468–475. <https://doi.org/10.31015/jaefs.2023.3.1>
22. Sarraf M., Kataria S., Taimourya H., Santos L.O., Menegatti R.D., Jain M., et al. Magnetic Field (MF) Applications in Plants: An Overview. *Plants*. 2020;9(9):1139. <https://doi.org/10.3390/plants9091139>
23. Antipkina L.A., Levin V.I., Borychev S.N., Simdyankin A.A., Kashirin D.E. Use of a Gradient Magnetic Field in the Pre-Sowing Treatment of Cucumber Seeds. *AgroEcoInfo*. 2022;(1):25. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.51419/202121123>
24. Yudaev I.V., Akimov A.A., Belenkov A.I., Plotnitsky I.O. Influence of Pre-Sowing Seed Treatment in a Magnetic Gradient Field on Growth, Development and Productivity of Long-Staple Flax. In: BIO Web of Conferences: International Scientific and Practical Conference “Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources” (FIES 2024). Kazan: EDP Sciences; 2025. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202516100062>

Об авторах:

Юдаев Игорь Викторович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электроснабжения Кубанского государственного аграрного университета имени И. Т. Трубилина

(350044, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Калинина, д. 13), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3435-4873>, Researcher ID: GRF-0468-2022, Scopus ID: 57191251878, SPIN-код: 6836-5529, etsh1965@mail.ru

Акимов Алексей Алексеевич, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, заведующий кафедрой агрохимии, земледелия и лесопользования Тверской государственной сельскохозяйственной академии (170904, Российская Федерация, г. Тверь, ул. Маршала Василевского (Сахарово), д. 7), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9363-6678>, Scopus ID: 57217391960, SPIN-код: 6890-2481, akimov-agro@yandex.ru

Скворцов Сергей Сергеевич, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, доцент кафедры растениеводства и технологий переработки льна Тверской государственной сельскохозяйственной академии (170904, г. Тверь, ул. Маршала Василевского (Сахарово), д. 7), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8128-070X>, SPIN-код: 4243-4968, sskvorcov@tvghsha.ru

Иванютина Наталья Николаевна, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры агробиотехнологий, перерабатывающих производств и семеноводства Тверской государственной сельскохозяйственной академии (170904, Российская Федерация, г. Тверь, ул. Маршала Василевского (Сахарово), д. 7), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6885-8607>, Scopus ID: 57221781403, SPIN-код: 3868-5960, nivanjutina@tvghsha.ru

Беленков Алексей Иванович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, консультант федерального научного центра кормопроизводства и агроэкологии имени В. П. Вильямса (141055, Российская Федерация, г. Лобня, ул. Научный городок, к. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0422-4936>, Scopus ID: 57216614445, SPIN-код: 8397-1599, belenokaleksis@mail.ru

Плотницкий Игорь Олегович, инженер-исследователь, генеральный директор ООО «Объединение инноваций» (142000, Российская Федерация, г. Домодедово, ул. Октябрьская, д. 97), <https://orcid.org/0009-0002-8253-2985>, pio100@yandex.ru

Вклад авторов:

И. В. Юдаев – контроль, лидерство и наставничество в процессе планирования и проведения исследования; формулирование идеи исследования, целей и задач; критический анализ черновика рукописи, внесение замечаний и исправлений, визуализация результатов исследования и полученных данных.

А. А. Акимов – разработка или проектирование методологии исследования; осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов или сбор данных; создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования и полученных данных; создание и подготовка рукописи: написание черновика рукописи, включая его перевод на иностранный язык.

С. С. Скворцов – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов или сбор данных.

Н. Н. Иванютина – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов или сбор данных.

А. И. Беленков – применение статистических, математических, вычислительных или других формальных методов для анализа, или синтеза данных исследования; формулирование исследования задач; критический анализ черновика рукописи, внесение замечаний и исправлений.

И. О. Плотницкий – разработка или проектирование методологии исследования; осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов или сбор данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 21.01.2026; поступила после рецензирования 25.02.2026;
принята к публикации 10.03.2026*

About the authors:

Igor V. Yudaev, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of «Power supply», I. T. Trubilin Kuban State Agricultural University (13 Kalinin St., Krasnodar 350044, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3435-4873>, Researcher ID: GRF-0468-2022, Scopus ID: 57191251878, SPIN-code: 6836-5529, etsh1965@mail.ru

Alexey A. Akimov, Cand.Sci (Agr.), Associate Professor, Head of the Department of Agrochemistry, Agriculture and Forest Management, Tver State Agricultural Academy (7 Marshal Vasilevsky St., (Sakharovo), Tver 170904, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9363-6678>, Scopus ID: 57217391960, SPIN-code: 6890-2481, akimov-agro@yandex.ru

Sergey S. Skvortsov, Cand.Sci (Agr.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Crop Production and Flax Processing Technologies, Tver State Agricultural Academy (7 Marshal Vasilevsky St., (Sakharovo), Tver 170904, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8128-070X>, SPIN-code: 4243-4968, sskvorcov@tvgsa.ru

Natalia N. Ivanyutina, Cand.Sci (Agr.), Associate Professor of the Department of Agrobiotechnology, Processing Industries and Seed Production, Tver State Agricultural Academy (7 Marshal Vasilevsky St., (Sakharovo), Tver 170904, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6885-8607>, Scopus ID: 57221781403, SPIN-code: 3868-5960, nivanjutina@tvgsa.ru

Aleksey I. Belenkov, Dr.Sci. (Agr.), professor, consultant, Federal Williams Research Center of Forage Production and Agroecology (1 Nauchny Gorodok St., Lobnya 141055, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0422-4936>, Scopus ID: 57216614445, SPIN-code: 8397-1599, belenokaleksis@mail.ru

Igor O. Plotnitsky, research engineer, general director, Association of Innovations LLC (97 Oktyabrskaya St., Domodedovo 142000, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8253-2985>, pio100@yandex.ru

Author contribution:

I. V. Yudaev – oversight and leadership responsibility for the research activity planning and execution, including mentorship external to the core team, formulation or evolution of overarching research goals and aims, preparation, preparation, creation of the published work by those from the original research group, specifically critical review, commentary or revision.

A. A. Akimov – development or design of methodology; conducting a research and investigation process, specifically performing the experiments, or data; preparation, creation of the published work, specifically visualization; preparation, creation of the published work, specifically writing the initial draft (including substantive translation).

S. S. Skvortsov – conducting a research and investigation process, specifically performing the experiments, or data collection.

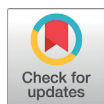
N. N. Ivanyutina – conducting a research and investigation process, specifically performing the experiments, or data collection.

A. I. Belenkov – application of statistical, mathematical, computational, or other formal techniques to analyses or synthesize study data; formulation of overarching research goals and aims; preparation, creation of the published work by those from the original research group, specifically critical review, commentary or revision.

I. O. Plotnitsky – development or design of methodology; conducting a research and investigation process, specifically performing the experiments, or data collection.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 21.01.2026; revised 25.02.2026; accepted 10.03.2026

МАШИНОСТРОЕНИЕ /
MECHANICAL ENGINEERING<https://doi.org/10.15507/2658-4123.26363.618-643>EDN: <https://elibrary.ru/ydnrzi>

УДК / UDK 631.354.2:001.8

Оригинальная статья / Original article

**Классификация режимов работы
гидроцилиндра зерноуборочного комбайна
по данным экспериментальных исследований****Н. В. Лимаренко** , **Д. Н. Савенков, М. К. Суханов***Донской государственный технический университет,
г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация, <https://ror.org/00x5je630>* nlimarenko@donstu.ru*Аннотация*

Введение. Энергоэффективность и эксплуатационная надежность зерноуборочных комбайнов в значительной степени определяется техническим состоянием гидравлического привода, отказы которого приводят к увеличению простоев и экономическим издержкам. При этом отсутствуют унифицированные экспериментально обоснованные подходы к формированию данных, пригодных для интеллектуальной поддержки принятия энергосберегающих решений при эксплуатации гидроагрегатов.

Цель исследования. Формирование репрезентативной выборки экспериментальных данных и разработка интерпретируемых моделей для дифференциации режимов работы гидроцилиндра жатки зерноуборочного комбайна RSM 161 в интересах интеллектуальной поддержки энергосберегающих решений.

Материалы и методы. Объектом исследования является гидроцилиндр жатки зерноуборочного комбайна RSM 161. Экспериментальные исследования выполнены на специально разработанном гидравлическом стенде с использованием методов планирования эксперимента. Варьируемыми факторами выбраны рабочее и нагрузочное давление, а также длительность хода штока. В качестве выходных параметров рассматривались температура гидравлического масла, падение давления в гидроцилиндре и ускорение штока в момент начала движения. Статистическая обработка данных и построение регрессионных моделей осуществлялись с применением методов регрессионного анализа.

Результаты исследования. Получены регрессионные модели второго порядка, описывающие зависимости выходных параметров от комбинаций эксплуатационных факторов. Установлена высокая предиктивная способность моделей температуры масла и ускорения штока ($R^2 = 0,99$ и $R^2 = 0,98$ соответственно), подтверждена статистическая значимость влияния рабочих режимов на энергетическую нагрузку гидроцилиндра. Совокупность измеряемых параметров позволяет устойчиво дифференцировать нормальный, переходный и перегруженный режимы работы гидропривода.

© Лимаренко Н.В., Савенков Д.Н., Суханов М.К., 2026

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

Закключение. Разработанная методика и полученные модели обеспечивают формирование структурированной и репрезентативной экспериментальной базы данных, пригодной для аугментации обучающих выборок и предварительного обучения нейросетевых алгоритмов. Результаты создают основу для разработки интеллектуальных систем поддержки принятия энергосберегающих решений и направлены на снижение энергетических потерь при повышении эксплуатационной надежности зерноуборочных комбайнов.

Ключевые слова: гидроцилиндр жатки, гидравлический привод, система поддержки принятия решений, режимы работы гидросистемы комбайна, эксплуатационная надежность, отказ гидроцилиндра жатки, энергоэффективность, интеллектуальная система

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: исследование выполнено в рамках реализации Грантового проекта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-03-2025-302/1 от 25.03.2025.

Для цитирования: Лимаренко Н.В., Савенков Д.Н., Суханов М.К. Классификация режимов работы гидроцилиндра зерноуборочного комбайна по данным экспериментальных исследований. *Инженерные технологии и системы*. 2026;36(3):618–643. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.26363.618-643>

Classification of the Operating Modes of a Combine Harvester Hydraulic Cylinder based on Experimental Study Data

N. V. Limarenko , D. N. Savenkov, M. K. Sukhanov

Don State Technical University,

Rostov-on-Don, Russian Federation, <https://ror.org/00x5je630>

 nlimarenko@donstu.ru

Abstract

Introduction. Improving the energy efficiency and operational reliability of combine harvesters is largely depends on the technical condition of the hydraulic drive, operational failures of which lead to increased downtime and economic costs. At the same time, there are no unified, experimentally based approaches to generating data suitable for intelligent support of energy-saving when operating hydraulic units.

Aim of the Study. The study is aimed at selecting representative sample of experimental data and developing interpretable models for differentiating the operating modes of the hydraulic cylinder of the combine harvester RSM 161 for intellectual support for energy-saving solutions.

Materials and Methods. The object of the study was the hydraulic cylinder of the combine harvester RSM 161. Experimental studies were performed on a specially designed hydraulic test rig using experimental planning methods. The operating and loading pressures, and the rod stroke time were selected as variable factors. The output parameters were the temperature of the hydraulic oil, the pressure drop in the hydraulic cylinder and the acceleration of the rod at the time of the start of movement. There were used regression analysis methods to process statistical data processing and construct regression models.

Results. There have been constructed the second-order regression models describing the dependences of output parameters on combinations of operational factors. There has been also found the high predictive ability of the oil temperature and rod acceleration models ($R^2 = 0.99$ and $R^2 = 0.98$, respectively) and there has been confirmed the statistical

significance of the influence of operating modes on the energy load of the hydraulic cylinder. The totality of the measured parameters makes it possible to consistently differentiate between normal, transient, and overload hydraulic drive operation modes.

Conclusion. The developed methods and models ensure the formation of a structured and representative experimental database, which can be used for augmentation of training samples and pre-training of neural network algorithms. The results create the basis to develop intelligent systems for making energy-efficient decisions and are aimed at reducing energy losses while increasing the operational reliability of combine harvesters.

Keywords: harvester hydraulic cylinder, hydraulic drive, intelligent system, support system for making decisions, operating modes of the combine hydraulic system, operational reliability, header hydraulic cylinder failure, energy efficiency

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

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.

For citation: Limarenko N.V., Savenkov D.N., Sukhanov M.K. Classification of the Operating Modes of a Combine Harvester Hydraulic Cylinder based on Experimental Study Data. *Engineering Technologies and Systems*. 2026;36(3):618–643. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.26363.618-643>

ВВЕДЕНИЕ

Развитие агропромышленного комплекса Российской Федерации в условиях реализации Доктрины продовольственной безопасности¹, стратегий развития агропромышленного и рыбохозяйственного комплексов до 2030 года² требует внедрения энергоэффективных и ресурсосберегающих технологий. В условиях технологических вызовов и санкционного давления увеличивается спрос на решения, обеспечивающие сохранность имеющегося машинно-тракторного парка [1; 2]. В значительной степени энергоэффективность сельскохозяйственной техники определяется коэффициентом ее готовности [3; 4]. Отказоустойчивость, ремонтпригодность, сохраняемость и долговечность узлов и компонентов сельскохозяйственных машин играют значительную роль при оценке энергоэффективности реализуемых ими процессов и операций. Известно, что критическое значение перечисленные показатели имеют для уборочной техники и, в частности, для зерноуборочных комбайнов (ЗК). Одним из показателей энергетической эффективности эксплуатации компонентов ЗК является коэффициент его технической готовности. Согласно данным Росстата, а также открытым публичным отчетам, парк ЗК в Российской Федерации по состоянию на конец 2022 года составляет порядка 51 тысячи единиц при усредненном коэффициенте готовности 0.9³.

¹ Доктрина продовольственной безопасности Российской Федерации [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/564161398?marker=65A0IQ> (дата обращения: 12.11.2025).

² Стратегия развития агропромышленного и рыбохозяйственного комплексов Российской Федерации на период до 2030 года [Электронный ресурс]. URL: <http://government.ru/docs/46497> (дата обращения: 12.11.2025).

³ Наличие техники, энергетических мощностей в сельскохозяйственных организациях Российской Федерации в 2022 году (Росстат). URL: http://ssl.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Nalich_texniki_2022.xlsx (дата обращения: 14.11.2025).

Одним из основных способов передачи энергии агрегатам сельскохозяйственной техники (СХТ) является гидравлический привод (ГП). Как видно из таблицы 1, простой, вызванный отказами ГП, является достаточно продолжительным. Представленные на рисунке в таблице 1 диаграмма цифры обобщают данные ресурса [4]. Выбор ГП в качестве объекта исследования обусловлен достаточно высокой частотой отказов, критической важностью для выполнения уборочных работ и отсутствием апробированных методов интеллектуальной диагностики для данного узла в отличие от моторной установки и ходовой части, где такие методы широко представлены. Соответственно, разработка интеллектуальных ассистентов, позволяющих повысить энергетическую эффективность использования и своевременно предупреждать отказ ГП, является значимой для науки и техники.

Таблица 1

Table 1

**Вероятности возникновения отказа узлов зерноуборочного комбайна
и соответствующие им продолжительности устранения отказа**

The probability of failure of the CC nodes and the corresponding duration of failure elimination

Узел / Component	Отказ, % / Refusal, %	Продолжительность устранения отказа, ч / Duration of failure elimination, h
Моторная установка / Engine installation	1,5	5,8
Ходовая часть / Undercarriage	1,1	4,2
Электрооборудование / Electrical equipment	6,7	0,5
Гидравлический привод / Hydraulic drive	10,0	1,5
Жатка / Harvester	34,0	0,5
Наклонная камера / Inclined camera	4,1	2,5
Механические передачи / Mechanical transmissions	24,2	3,0
Транспортеры и привода / Conveyors and drives	7,6	4,5
Молотильный аппарат / Threshing machine	1,6	2,6
Сепаратор / Separator	0,7	0,5
Копнитель / Stacker	0,5	0,5
Компоненты кузова / Body components	3,7	1,1
Вспомогательные элементы / Auxiliary elements	4,3	1,7

Источник: таблицы 1–2 составлены авторами статьи.

Source: The tables 1–2 were compiled by the authors of the article.

Несмотря на то, что коэффициент технической готовности имеет косвенную связь с параметрами, характеризующими энергетическую эффективность зерноуборочного комбайна, он позволяет отследить вклад отказов по их категориям.

Для оценки экономических затрат и выявления значимости внедрения технических решений, направленных на повышение энергетической эффективности ЗК, приведены усредненные значения затрат на эксплуатацию: расход дизельного топлива на 1 га – 10 л, средняя цена за литр дизельного топлива – 70 руб., суточная производительность комбайна – 50 га, рабочих дней в году – 70.

Практикой установлено, что минимально достаточным уровнем достижения энергоэффективной эксплуатации ЗК является сокращение топливных затрат на 7 %. На основе эмпирических показателей эксплуатирования зерноуборочных комбайнов и принятого показателя сокращения топливных затрат экономия на единицу техники может составить порядка 75 тыс. руб./г. Если принять, что на одно хозяйство Ростовской области в среднем приходится 3 комбайна, то прогнозная экономия может составить порядка 220 тыс. руб./г. По данным Росстата⁴ парк зерноуборочных комбайнов на конец 2022 года составил порядка 51 тыс. ед. техники. Таким образом, экономический эффект в рамках страны при достижении принятого значения экономии топливных затрат составит порядка 4 млрд. руб./г.

Установлено, что ключевым рабочим элементом ГП, а соответственно и наиболее нагруженным узлом, является гидроцилиндр. Преждевременный выход из строя этого узла приводит к значительным экономическим потерям, обусловленным простоем техники. В результате проведенного предварительного исследования⁵ и анализа практик [5–7] было установлено, что ГП жатки демонстрирует наиболее высокие показатели интенсивности износа, что обуславливает выбор этого узла в качестве объекта исследования. В частности, отсутствуют унифицированные методики сбора и нормирования данных о рабочих параметрах гидроагрегатов, учитывающие их специфику и условия эксплуатации [8]. В процессе эксплуатации гидроцилиндра изнашивается его шток, что связано с жесткими условиями эксплуатации при высоком рабочем давлении и температуре гидрожидкости в гидравлическом контуре. При этом закономерности влияния условий эксплуатации ГП на эксплуатационную надежность [9] и остаточный ресурс СХТ [6; 10] также изучены недостаточно.

В процессе эксплуатации гидроцилиндр подвержен большому количеству циклических знакопеременных нагрузок, приводящих к ускоренному износу штока и потере герметичности гидроцилиндра. Результатом является просадка давления гидрожидкости, а также рост энергопотребления, приводящий к переходу с нормального режима работы на перегруженный. Продолжение эксплуатирования такого цилиндра приводит к скорому выходу из строя системы ГП и необходимости замены гидроцилиндра. Известно, что процесс выхода из строя ГП можно разделить на три стадии: нормальная, переходная и перегруженная. При изменении состояния с нормального на переходное и далее на перегруженное происходит ухудшение функциональных характеристик гидроцилиндра, в частности, повышаются энергетические потери при работе узла. Кроме того, возрастает вероятность отказа

⁴ Наличие техники, энергетических мощностей в сельскохозяйственных организациях Российской Федерации в 2022 году (Росстат).

⁵ Лимаренко Н.В. Способы и инструменты повышения эксплуатационной эффективности узлов и агрегатов сельскохозяйственной техники: моногр. Ростов-на-Дону; 2024. URL: <https://ntb.donstu.ru/content/sposoby-i-instrumenty-povysheniya-ekspluatacionnoy-effektivnosti-uzlov-i-agregatov-selskohozyaystvennoy-tehniki?ysclid=m1za67z6qq360607673&clid=9bddce25> (дата обращения: 27.09.2025).

техники в процессе эксплуатации, что влечет за собой значимые экономические риски. В связи с этим предсказание отказа и оценки остаточного ресурса работы гидроцилиндра комбайна является приоритетной задачей.

Для решения этой задачи требуется система поддержки принятия энергоэффективных решений, которая позволит минимизировать экономические затраты за счет информирования механизатора о приближающемся риске отказа гидроцилиндра или необходимости его ежедневного технического обслуживания. Для реализации заявленного механизма необходимо определить значимость корреляций между изменением физико-механических характеристик гидроцилиндра жатки и его остаточным рабочим ресурсом.

Цель исследования – формирование репрезентативной выборки экспериментальных данных для интеллектуальной системы поддержки принятия энергосберегающих решений по эксплуатационным показателям гидроцилиндра, на примере жатки зерноуборочного комбайна RSM 161.

Для достижения поставленной цели необходимо обосновать актуальность и практическую ценность разработки системы поддержки принятия энергосберегающих решений при эксплуатации зерноуборочного комбайна; разработать методику проведения экспериментальных исследований для формирования тестовой выборки дифференцирующей режимы работы гидроцилиндра жатки зерноуборочного комбайна RSM 161; провести экспериментальные исследования, осуществить сбор и систематизацию данных, получить выборки параметров, характеризующих режимы работы гидроцилиндра жатки; оценить статистическую значимость полученных данных, их репрезентативность и возможность применения для предобучения прогностической модели нейронной сети.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Интеллектуализированные системы активно внедряются в агропромышленный комплекс большинства стран [11–13]. Многие исследования направлены на их разработку и применение в фермерской практике: для предсказания урожайности культур [14; 15], скорости их роста [16], автоматического поиска сорняков [17] и автоматизированного контроля за состоянием полей [18]. Одним из способов повышения эффективности сбора урожая может быть минимизация простоя СХТ вследствие ремонта и отказов [7]. Ресурсные испытания и мониторинг технического состояния СХТ, включая ГП, критически важны для обеспечения их эксплуатационной надежности и энергоэффективности [7; 19]. Современные тенденции в области мониторинга технического состояния СХТ связаны с активным внедрением интеллектуализированных систем и систем поддержки принятия решений [20], включающих элементы роботизации [21], искусственного интеллекта [22], методы имитационного моделирования [23–25] и цифровые двойники [24; 25]. До начала разработки и последующего внедрения таких систем проводятся предварительные исследования для оценки параметров режимов функционирования СХТ [26; 27]. После этого составляется обоснование оптимальности зафиксированных параметров [24; 28] или предложение возможных модификаций для улучшения эксплуатационных характеристик [29; 30].

Методы имитационного моделирования с возможностью разработки цифрового двойника моделируемого объекта применимы для случаев, когда эффекты

парного взаимодействия факторов незначительны или законы их взаимодействия в рамках рассматриваемых граничных условий известны [25]. Цифровые двойники и математические модели применительно к контролю состояния элементов СХТ не позволяют достичь достаточной предсказательной точности по причине невозможности учета комплексного влияния множества внешних факторов, которые вносят вклад в износ компонентов СХТ [31]. Для ГП таким комплексным воздействием, оказывающим существенное влияние на износ, обладает сочетание следующих факторов [8]: марки гидравлической жидкости, ее температуры и рабочего давления ГП. В задачах, рассматривающих комплексное влияние факторов различной природы на параметры качества функционирования гидросистемы, рационально использование систем с элементами искусственных нейронных сетей (ИНС). Применение ИНС для контроля состояния узлов СХТ позволяет получать данные не только при известных комбинациях внешних факторов, но и при изначально неучтенных их сочетаниях с приемлемой степенью точности [30; 31].

Анализ публикаций иллюстрирует растущую тенденцию в области разработки интеллектуализированных систем контроля состояния узлов СХТ на отечественном рынке [7; 22; 32]. Однако выявлено отсутствие практик использования интеллектуальных систем поддержки принятия решений применительно к контролю состояния гидропривода зерноуборочного комбайна, что является предпочтительным решением. Применение элементов ИНС при разработке такой системы позволит достичь достаточной точности оценки состояния узлов ЗК и в конечном итоге повысить уровень энерго- и ресурсосбережения машинно-тракторного парка.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования

Объектом исследования является гидроцилиндр жатки зерноуборочного комбайна RSM 161, предметом – параметры, характеризующие режимы его работы. В качестве гидрожидкости в таких гидроцилиндрах применяются специализированные минеральные масла. Гидроцилиндр выполняет функцию исполнительного механизма, предназначенного для подъема и опускания жатки комбайна, а также для поддержания ее в заданном положении. Диапазон рабочего давления гидроцилиндра жатки комбайна находится в пределах от 160 до 360 МПа.

Методы исследования

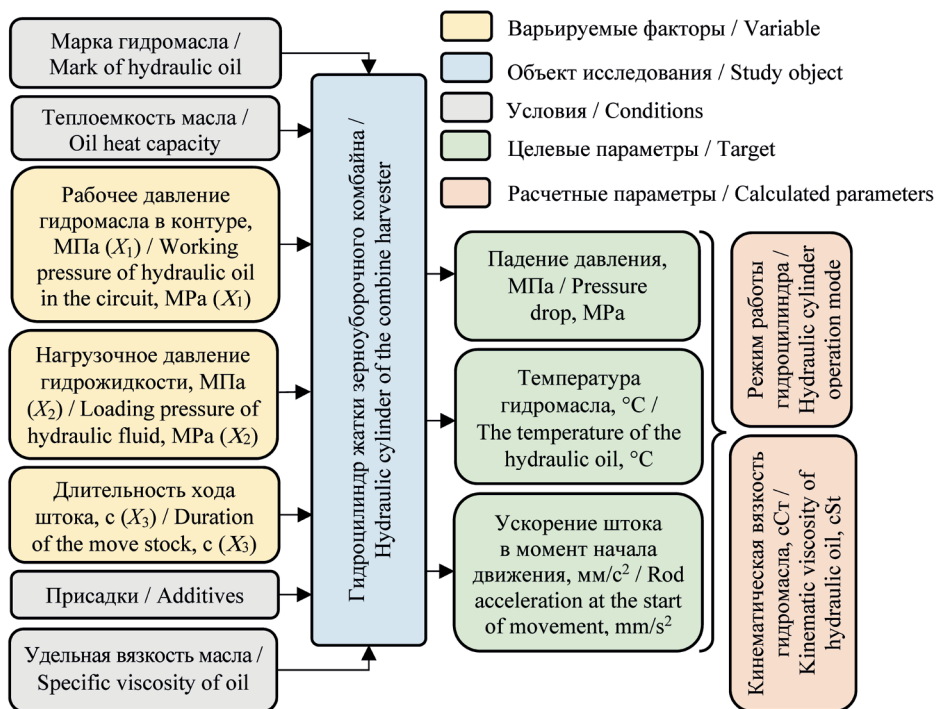
На основе принципа работы гидроцилиндра жатки приняли давление в поршневой полости рабочим, а в штоковой – нагрузочным. Длительность хода штока характеризует не только разницу давлений в полостях гидроцилиндра, но и величину трения штока. Так, в качестве варьируемых факторов, оказывающих влияние на функционирование гидроцилиндра, выбраны: рабочее и нагрузочное давление, длительность хода штока.

Основное разрушающее воздействие масел на элементы гидросистемы оказывает трение. Известно, что к основным физико-химическим показателям масла, влияющим на возникновение трения, относятся: доля содержания противоизносных, антиокислительных, противопенных и деэмульгирующих присадок, оказывающих влияние на удельную вязкость масла. Для динамического контроля состояния масла необходимо знать закон изменения кинематической вязкости

в зависимости от температуры, установленный для применяемой марки масла. Перечисленные показатели масла статичны и характеризуют условия проводимого экспериментального исследования.

Режимы работы гидроцилиндра по энергопотреблению подразделяются на нормальный, переходный и перегруженный. Изменение рабочего режима сопровождается изменением ряда показателей гидроцилиндра, которые могут быть измерены. Переходный и перегруженный режимы связаны с просадкой рабочего давления в гидроцилиндре. В этом случае требуется повышение рабочего давления для совершения той же работы по перемещению штока. Увеличение давления приводит к ускоренному росту температуры относительно нормального режима, из-за чего кинематическая вязкость масла и трение штока уменьшаются. Вследствие этого усиливаются утечки масла. Описанные изменения можно зафиксировать по ускорению штока в момент начала движения и по температуре масла. Таким образом, чтобы определить режим работы гидроцилиндра при определенной комбинации факторов и условий достаточно измерения температуры масла, падения давления и ускорения штока в момент начала движения.

На основе описанных параметров качества функционирования гидроцилиндра, условий и факторов составлена кибернетическая модель исследования, представленная на рисунке 1.



Р и с. 1. Кибернетическая модель исследования

F i g. 1. The cybernetic study model

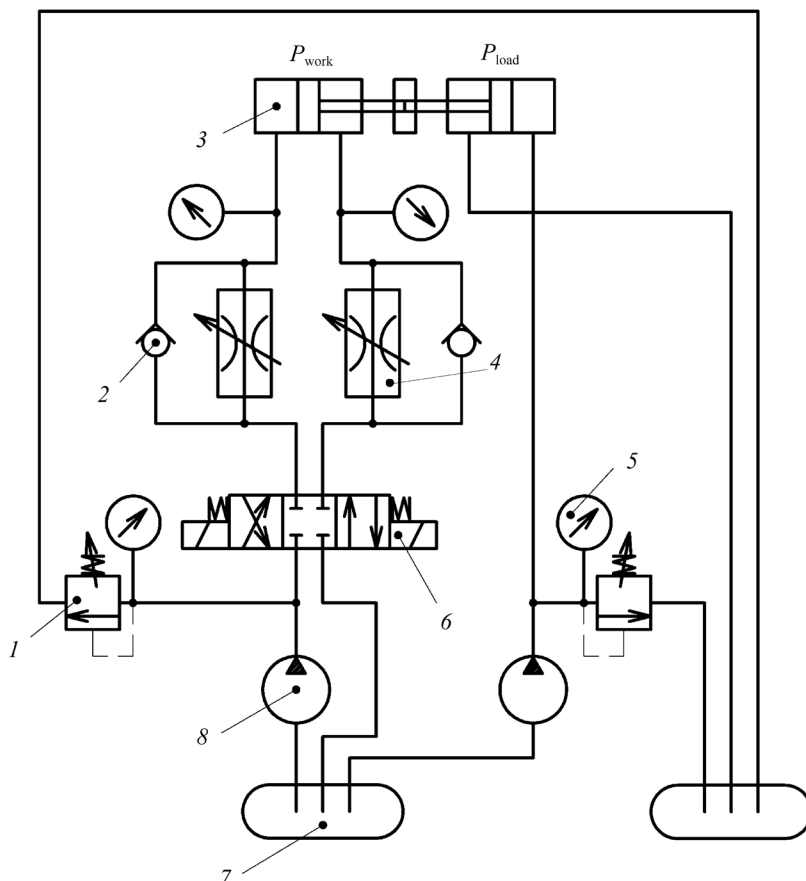
Источник: рисунок 1 составлен авторами статьи в программе Microsoft Excel 2022.

Source: Figures 1 was compiled for the authors of the article in the program Microsoft Excel 2022.

Оборудование

Для проведения экспериментальных исследований использовался гидравлический стенд, имитирующий работу гидропривода жатки зерноуборочного комбайна. Он позволил воспроизводить различные режимы нагружения гидроцилиндра с контролем рабочих параметров.

На рисунке 2 представлена гидравлическая схема экспериментального стенда, а на рисунке 3 – его общий вид.

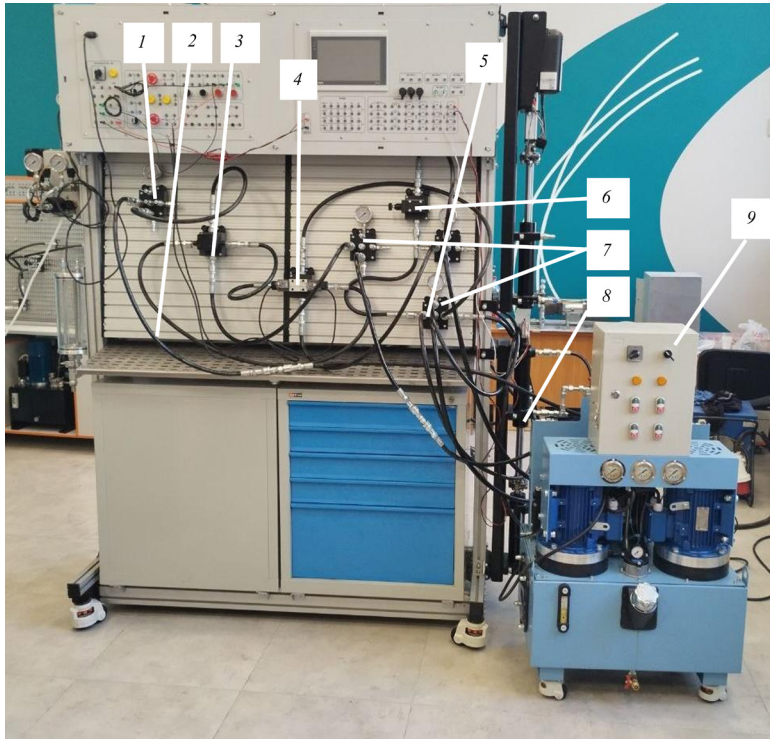


Р и с. 2. Гидравлическая принципиальная схема экспериментального стенда:
1 – клапан предохранительный (2 шт.); 2 – клапан обратный (2 шт.); 3 – гидроцилиндр (2 шт.);
4 – дроссель регулируемый (2 шт.); 5 – манометр механический (4 шт.);
6 – гидрораспределитель 4/3 (1 шт.); 7 – закрытый гидробак с давлением выше атмосферного (1 шт.);
8 – насос с неревверсивным потоком (2 шт.)

F i g. 2. Hydraulic schematic diagram of the experimental stand: 1 – safety valve (2 pcs);
2 – check valve (2 pcs); 3 – hydraulic cylinder (2 pcs); 4 – adjustable throttle (2 pcs);
5 – mechanical pressure gauge (4 pcs); 6 – hydraulic distributor 4/3 (1 pc);
7 – closed hydraulic tank with pressure above atmospheric pressure (1 pc);
8 – non-reversible flow pump (2 pcs)

Источник: рисунок 3 составлен авторами статьи в программе Компас 3D.

Source: Figures 3 was compiled for the authors of the article in the program Kompas 3D.



Р и с. 3. Общий вид экспериментального стенда: 1 – датчики давления манометрические; 2 – рукава высокого давления; 3 – дроссель модульный с обратным клапаном HQ-012 52; 4 – гидрораспределитель DHE-0711 DC 20; 5 – датчик температуры TT41; 6 – модульный предохранительный клапан HM-011/350 40; 7 – плита коллекторная с манометром; 8 – гидравлический нагружатель поступательного действия; 9 – гидростанция стенда

F i g. 3. General view of the test rig: 1 – pressure gauge sensors; 2 – high pressure hoses; 3 – the throttle module with a check valve HQ-012 52; 4 – hydraulic distributor DHE-0711 DC 20; 5 – temperature sensor TT41; 6 – modular safety valve HM-011/350 40; 7 – collector plate with pressure gauge; 8 – translational hydraulic loader; 9 – hydroelectric station of the test rig

Источник: фотография для рисунка 4 была сделана авторами статьи при проведении экспериментальных исследований на базе научно-исследовательской лаборатории РСМ-STAR Донского государственного технического университета.

Source: The photograph for the Figure 4 was taken by the authors of the article during experimental studies at the RSM-STAR research laboratory of the Don State Technical University.

Стенд состоит из двух гидравлических контуров (рабочего и нагрузочного), которые связаны через общий сливной бак. Рабочий контур имитирует работу гидропривода жатки зерноуборочного комбайна, а нагрузочный – веса жатки. Верхний гидроцилиндр имитирует работу реального гидроцилиндра жатки и называется рабочим. Нижний гидроцилиндр имеет общий шток с рабочим и является нагрузочным. Для моделирования нагрузки веса жатки при помощи нагрузочного цилиндра регулируется обратное давление на шток за счет настройки давления в нагрузочном контуре.

Для испытаний использовалось минеральное масло вязкости ISO VG 32, применяемое на комбайнах RSM и соответствующее стандарту ГОСТ Р 59107-2020⁶.

При проведении экспериментального исследования была использована математическая теория планирования. На основании сформированных критериев оптимальности выбран G -оптимальный план проведения экспериментов. В исследовании варьировалось три фактора: рабочее (поршневое) давление X_1 , нагрузочное (штоковое) давление X_2 и длительность хода штока X_3 . В ходе проведения предварительных исследований для каждого фактора были определены уровни варьирования факторов. Такой подход позволяет построить трехуровневый план эксперимента, соответствующий плану Бокса – Бенкена и являющийся приемлемым с точки зрения практики для формирования регрессионной модели. Сформулированные факторы и уровни их варьирования были сведены в таблицу 2, где каждому уровню варьирования фактора соответствует значение кодированной переменной.

Т а б л и ц а 2

Table 2

Факторы и уровни их варьирования
Factors and levels of their variation

Варьируемые факторы / Variable factors	Уровень варьирования / The level of variation		
	Нижний / Lower (-1)	Средний / Average (0)	Верхний / Upper (+1)
Рабочее давление X_1 , бар / Operating pressure X_1 , bar	110	160	210
Давление в нагрузке X_2 , бар / Load pressure X_2 , bar	60	100	140
Продолжительность X_3 , с / Time X_3 , s	20	15	10

Трехуровневый план эксперимента Бокса – Бенкена предназначен для построения трех регрессионных моделей, которые в экспериментах являются целевыми переменными:

- первая модель необходима для предсказания температуры масла в гидравлическом контуре (Y_1 – вещественное число, °C);
- вторая модель служит для предсказания падения давления в гидроцилиндре (Y_2 – целое число, бар) в момент его нагружения;
- третья модель позволяет определять ускорение штока гидроцилиндра в момент начала его движения (Y_3 – вещественное число, м/с²).

Матрица планирования в кодированных и натуральных переменных представлена в таблице 3.

⁶ ГОСТ Р 59107-2020. Масла базовые. Технические условия. URL: <https://docs.cntd.ru/document/566395793> (дата обращения: 04.08.2025).

Матрица планирования в кодированных переменных

The planning matrix in coded variables

Кодированные / Coded			Натуральные / Natural			Отклики / Responses		
X_1	X_2	X_3	X_1	X_2	X_3	Y_1	Y_2	Y_3
-1	-1	-1	110	60	20	62	43	0,77
-1	-1	0	110	60	15	64	50	1,33
-1	-1	1	110	60	10	66	50	2,98
-1	0	-1	110	100	20	99	45	0,70
-1	0	0	110	100	15	100	47	1,35
-1	0	1	110	100	10	100	48	3,26
-1	1	-1	110	140	20	130	54	0,80
-1	1	0	110	140	15	130	57	1,20
-1	1	1	110	140	10	131	63	2,91
0	-1	-1	160	60	20	72	41	0,74
0	-1	0	160	60	15	72	48	1,32
0	-1	1	160	60	10	73	50	3,02
0	0	-1	160	100	20	111	36	0,75
0	0	0	160	100	15	112	41	1,34
0	0	1	160	100	10	112	43	3,01
0	1	-1	160	140	20	144	45	0,80
0	1	0	160	140	15	146	46	1,40
0	1	1	160	140	10	146	45	3,18
1	-1	-1	210	60	20	69	50	0,75
1	-1	0	210	60	15	70	50	1,35
1	-1	1	210	60	10	70	50	2,99
1	0	-1	210	100	20	110	36	0,84
1	0	0	210	100	15	115	34	1,65
1	0	1	210	100	10	118	32	3,79
1	1	-1	210	140	20	152	70	0,71
1	1	0	210	140	15	152	74	1,58
1	1	1	210	140	10	153	83	3,19

Работа с данными осуществлялась с использованием функций, написанных на Python. Предварительная обработка и систематизация осуществлялись при помощи библиотеки NumPy. Статистический анализ, включая формирование регрессионных моделей и оценку их статистических показателей, осуществляли при помощи библиотеки Scikit-learn. Для визуализации данных применялся пакет Statistica 6.0.

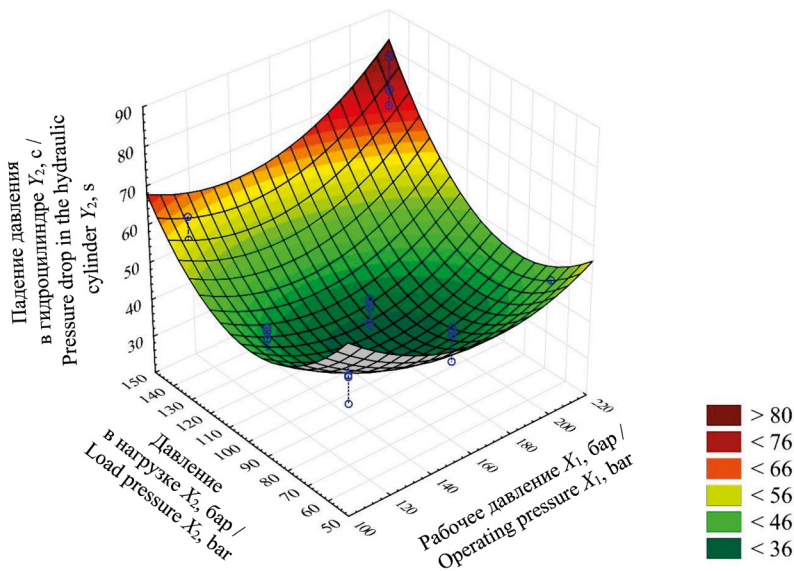
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На основе экспериментальных данных с использованием методов регрессионного анализа были сформированы регрессионные модели, представленные полиномами второй степени, за счет чего удалось достичь достаточной степени точности регрессионных моделей при сохранении физической интерпретируемости аппроксимирующей поверхности для всех полученных моделей.

Для зависимости падения давления в гидроцилиндре от комбинации рабочего X_1 и нагрузочного X_2 давления сформирована следующая регрессионная модель:

$$Y_2 = 0,0085X_2^2 + 0,0032X_1^2 + 0,0019X_1X_2 - 1,8628X_2 - 1,2045X_1 + 215,2219.$$

Аппроксимирующая поверхность, построенная на основе рассматриваемой модели, представлена на рисунке 4. Также на аппроксимирующие поверхности, приведенные на рисунках 4–9, нанесены экспериментальные точки, позволяющие визуально оценить разброс эмпирических данных относительно предсказанных значений. Они являются представительной иллюстрацией приведенным значениям коэффициентов детерминации R^2 .



Р и с. 4. Поверхность отклика падения давления в гидроцилиндре Y_2 в зависимости от рабочего давления гидросистемы X_1 и давления в нагрузке X_2

Fig 4. The pressure drop response surface in the hydraulic cylinder Y_2 depends on the operating pressure of the hydraulic system X_1 and the pressure under the load X_2

Источник: рисунки 4–9 составлены авторами статьи в программе Statistica 10.

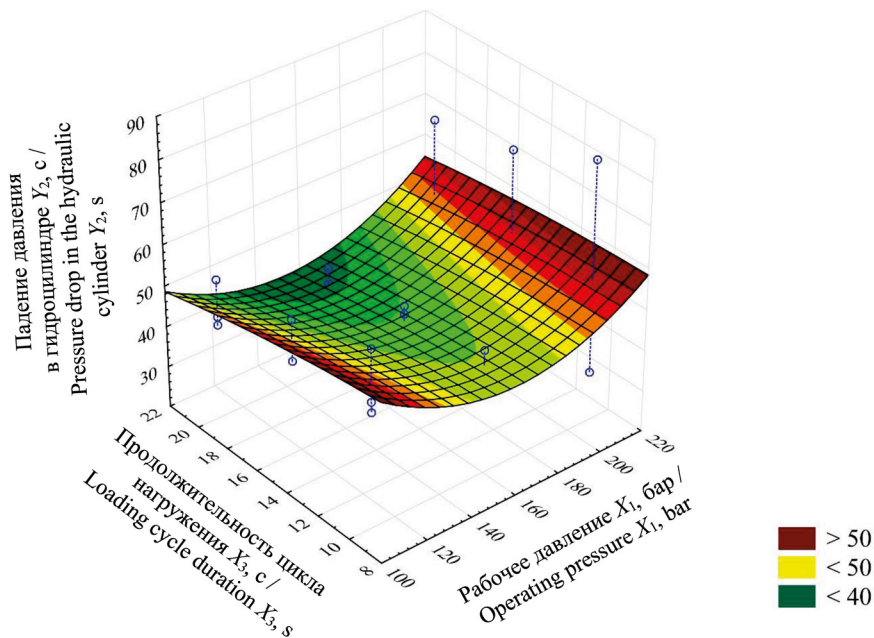
Source: Figures 4–9 was compiled for the authors of the article in the program Statistica 10.

Установлено, что минимальное падение давления в гидроцилиндре характеризует меньшую нагрузку на гидропривод. Из рисунка 4 видно, что наименее нагруженными являются состояния гидросистемы при комбинации рабочего и нагрузочного давлений порядка 160 и 110 бар соответственно. Наибольшая нагрузка на гидроцилиндр оказывается при максимальном рабочем давлении.

Зависимость падения давления в гидроцилиндре от комбинации рабочего давления X_1 и продолжительности цикла нагружения X_3 формализуется следующей регрессионной моделью:

$$Y_2 = -0,02X_3^2 + 0,0032X_1^2 + 0,0035X_1X_3 - 0,4489X_3 - 1,0633X_1 + 134,4622.$$

На основе описанной регрессионной модели построена аппроксимирующая поверхность (рис. 5).



Р и с. 5. Поверхность отклика падения давления в гидроцилиндре Y_2 в зависимости от рабочего давления X_1 и продолжительности цикла нагружения X_3

Fig. 5. The pressure drop response surface in the hydraulic cylinder Y_2 depends on the operating pressure X_1 and the duration of the loading cycle X_3

По приведенному графику (рис. 5) видно, что падение давления в гидроцилиндре Y_2 медленно возрастает с увеличением длительности цикла нагружения X_3 . При этом падение давления Y_2 от рабочего давления масла в гидравлическом контуре X_1 зависит параболически. Так как меньшее падение давления характеризует минимальную нагрузку на гидропривод, то наименьшую нагрузку гидравлическая система испытывает при минимальной продолжительности цикла нагружения X_3 и средних значениях рабочего давления X_1 из рассматриваемого диапазона. Наиболее нагруженным режимом в рассматриваемом случае является комбинация максимальной продолжительности цикла нагружения системы X_3 и крайнего значения рабочего давления X_1 в рамках учтенного диапазона.

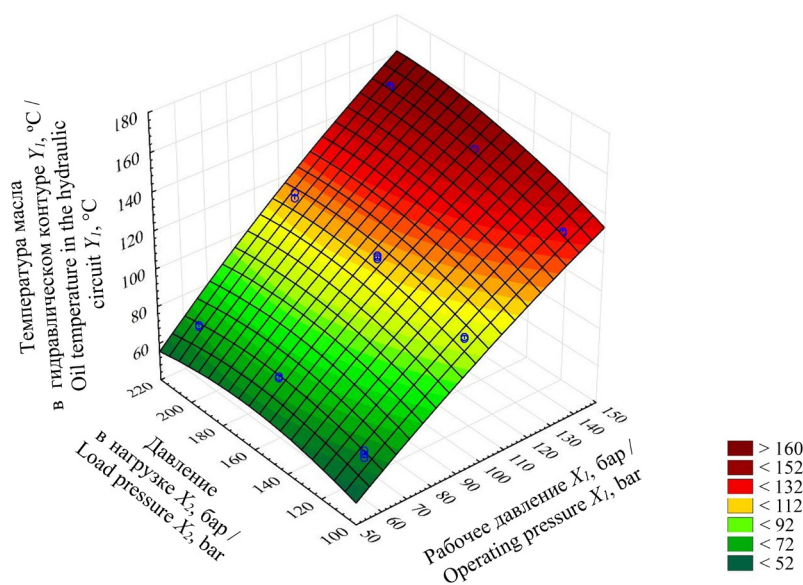
Используя методики математической теории планирования эксперимента и последующего регрессионного анализа, были получены функциональные зависимости, представленные ниже. Фундаментальные основы используемых методик представлены Н. Драйнером и Г. Смитом⁷, практический опыт их использования описан в предыдущих исследованиях [33–35].

⁷ Драйнер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. М.: Статистика. 1973. 392 с.

Для аппроксимации зависимости температуры масла в гидравлическом контуре Y_1 от комбинации рабочего X_1 и нагрузочного давлений X_2 сформирована следующая регрессионная модель:

$$Y_1 = -0,0019X_2^2 - 0,0019X_1^2 + 0,002X_1X_2 + 0,9719X_2 + 0,5542X_1 - 38,6009.$$

Рассматриваемая модель представлена в виде аппроксимирующей поверхности на рисунке 6.



Р и с. 6. Поверхность отклика температуры масла в гидравлическом контуре Y_1 в зависимости от рабочего X_1 и нагрузочного давлений X_2

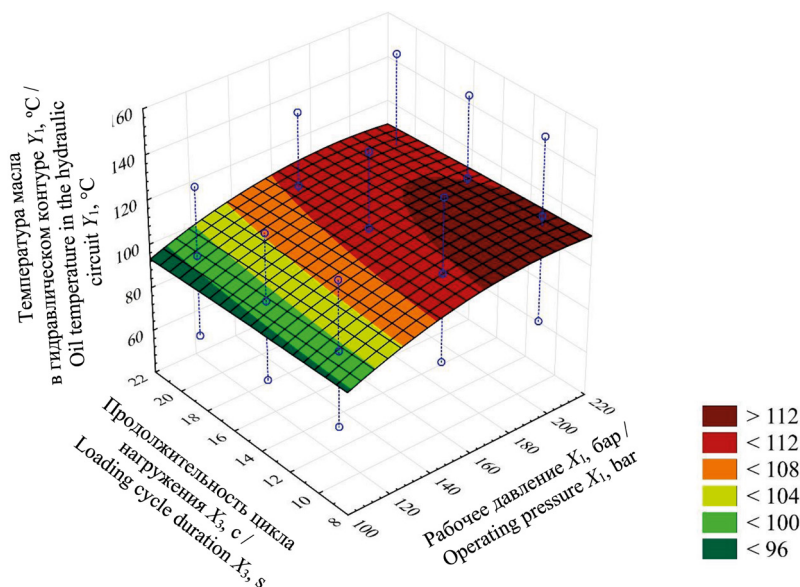
F i g. 6. The response surface of the oil temperature in the hydraulic circuit Y_1 depends on the operating X_1 and load pressures X_2

На основе приведенной диаграммы можно сделать вывод, что при увеличении нагрузочного давления X_2 растет и температура масла в гидравлическом контуре Y_1 . Однако повышение рабочего давления X_1 также оказывает влияние на рост температуры Y_1 , причем это влияние усиливается с повышением давления в нагрузке X_2 .

Далее представлена регрессионная модель зависимости температуры масла в гидравлическом контуре Y_1 от комбинации варьируемых параметров: рабочее давление X_1 и продолжительность цикла нагружения X_3 . Регрессионная модель имеет вид:

$$Y_1 = -0,0069X_3^2 - 0,0019X_1^2 - 0,0013X_1X_3 + 0,1878X_3 + 0,7784X_1 + 36,7686.$$

Описываемая регрессионная модель визуализирована в виде аппроксимирующей поверхности на рисунке 7.



Р и с. 7. Поверхность отклика температуры масла в гидравлическом контуре Y_1 в зависимости от рабочего давления X_1 и продолжительности цикла нагружения X_3

F i g. 7. The response surface of the oil temperature in the hydraulic circuit Y_1 depends on the operating pressure X_1 and the time of the loading cycle X_3

Рассматриваемая поверхность показывает рост температуры масла в гидравлическом контуре Y_1 при возрастании рабочего давления масла X_1 . При этом увеличение продолжительности цикла нагружения X_3 незначительно повышает температуру масла Y_1 на несколько градусов. В данной комбинации варьируемых факторов наименее нагруженным режимом для гидропривода является работа при минимальном рабочем давлении X_1 , которое характеризуется относительно низкой температурой масла Y_1 .

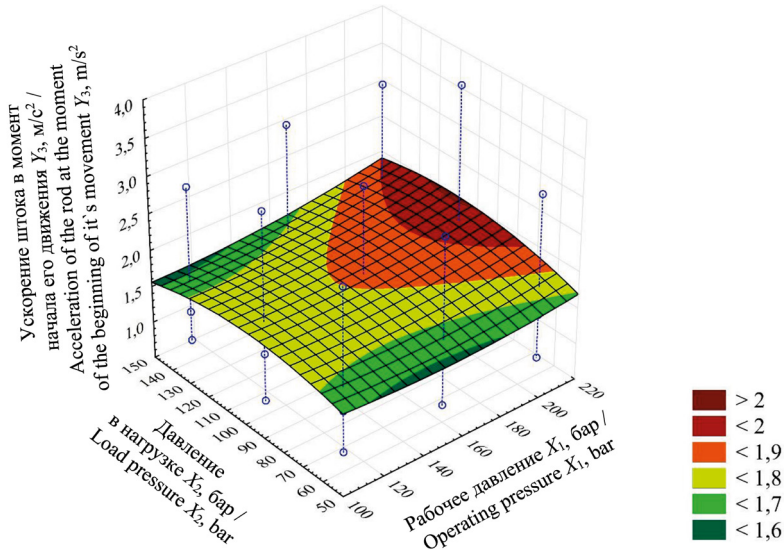
Рассмотрели, как изменяется ускорение штока гидроцилиндра в момент начала его движения Y_3 при варьировании значений комбинации рабочего X_1 и нагрузочного X_2 давлений в гидроцилиндре. Регрессионная модель для математического обобщения данной зависимости имеет вид:

$$Y_3 = -0,000082X_2^2 + 0,000023X_1^2 + 0,000023X_1X_2 + 0,0134X_2 - 0,0079X_1 + 1,6084.$$

Аппроксимирующая поверхность, характеризующая рассматриваемую зависимость, представлена на рисунке 8.

На основе рассмотренной поверхности, представленной на рисунке 8, видно, что ускорение штока гидроцилиндра в момент начала его движения Y_3 постепенно возрастает с ростом рабочего давления масла в гидравлическом контуре X_1 . При этом на ускорение штока Y_3 нагрузочное давление X_2 влияет

параболически. Наиболее плавное начало движение штока гидроцилиндра характеризуется минимизацией воздействия сил трения и замедлением процесса износа гидроцилиндра в целом. Поэтому гидропривод наименее нагружен при крайних значениях давления в нагрузке X_2 из учтенного диапазона значений и минимальном рабочем давлении X_1 .



Р и с. 8. Поверхность отклика ускорения штока гидроцилиндра в момент начала его движения Y_3 в зависимости от комбинации рабочего X_1 и нагрузочного X_2 давлений

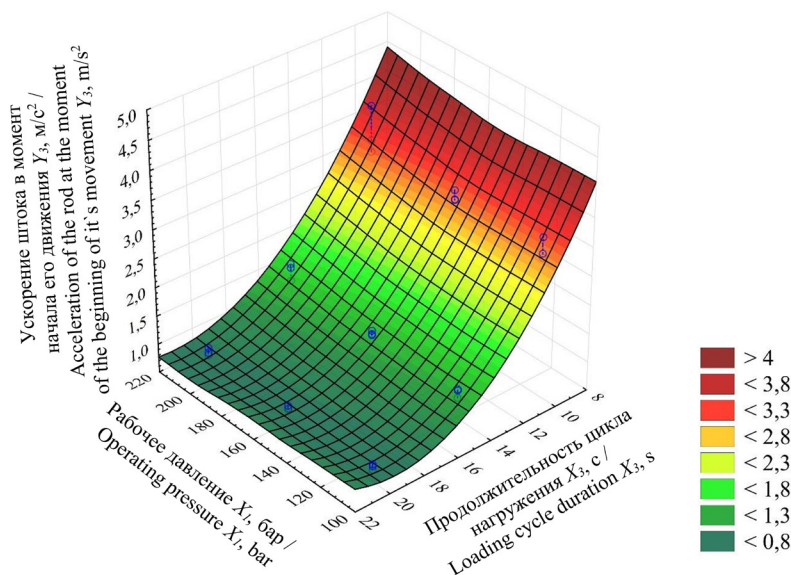
F i g. 8. The surface of the acceleration response of the hydraulic cylinder rod at the moment of its movement Y_3 , depending on the combination of operating X_1 and loading X_2 pressures

Ускорение штока гидроцилиндра в момент начала его движения Y_3 в зависимости от комбинации рабочего давления масла X_1 и продолжительности цикла нагружения X_3 характеризуется регрессионным уравнением:

$$Y_3 = 0,0226X_3^2 + 0,000023X_1^2 - 0,0003X_1X_3 - 0,8731X_3 - 0,0017X_1 + 9,6847.$$

Для визуализации рассмотренной модели построена аппроксимирующая поверхность (рис. 9).

Представленная поверхность иллюстрирует прямую зависимость ускорения штока Y_3 от продолжительности цикла нагружения X_3 . Однако увеличение рабочего давления X_1 не оказывает значимого влияния на изменение ускорения штока гидроцилиндра в момент начала его движения Y_3 . Так как возрастание ускорения связано с ростом нагрузки на гидропривод, то с увеличением продолжительности цикла нагружения гидроцилиндра X_3 растет и нагрузка на гидропривод.



Р и с. 9. Поверхность отклика ускорения штока гидроцилиндра в момент начала его движения Y_3 в зависимости от комбинации рабочего давления X_1 и продолжительности цикла нагружения X_3

F i g. 9. The surface of the acceleration response of the hydraulic cylinder rod at the moment of its movement Y_3 , depending on the combination of operating pressure X_1 and the time of the loading cycle X_3

После обобщения результатов экспериментальных исследований были получены уравнения регрессии для трех исследуемых параметров системы (Y_1 , Y_2 , Y_3). Для описания зависимости температуры масла в гидроцилиндре Y_1 от комбинации исследуемых факторов (X_1 , X_2 , X_3) получена модель:

$$Y_1 = 111,991 + 7,060X_1 + 37,000X_2 - 1,161X_3 + 4,080X_1X_2 - 0,330X_1X_3 - 4,820X_1^2 - 2,990X_2^2 - 0,170X_3^2. \quad (1)$$

Коэффициент детерминации модели (1) $R^2 = 0,99$, что свидетельствует о достаточно высокой предиктивной способности модели. F -критерий модели значим при уровне $\alpha = 0,05$ ($F_{\text{calc.}} = 1932,7$ (при $F_{\text{cr.}} = 2,56$), $p < 10^{-20}$). Статистически значимыми (при $\alpha = 0,05$) оказались линейные эффекты рабочего и нагрузочного давления (X_1 , X_2), взаимодействие X_1X_2 , а также квадратичные эффекты X_1^2 , X_2^2 . Следовательно, модель адекватно описывает влияние рассматриваемых факторов на температуру масла и может использоваться при прогнозировании построения границ режимов работы гидроцилиндра.

Для описания зависимости падения давления в гидроцилиндре Y_2 от комбинации исследуемых факторов (рабочее X_1 и нагрузочное X_2 давление, продолжительность цикла нагружения гидроцилиндра X_3) получена модель:

$$Y_2 = 35,220 + 1,190X_1 + 5,810X_2 - 2,440X_3 + 3,880X_1X_2 + 0,881X_1X_3 - 0,460X_2X_3 + 8,080X_1^2 + 13,580X_2^2 - 0,502X_3^2. \quad (2)$$

Коэффициент детерминации модели (2) $R^2 = 0,68$. F -критерий модели значим при уровне $\alpha = 0,05$ ($F_{\text{calc.}} = 3,89$ (при $F_{\text{cr.}} = 2,56$), $p < 0,0077$), что подтверждает общую адекватность модели. Статистически значимыми (при $\alpha = 0,05$) оказались линейный эффект нагрузочного давления X_2 и квадратичные эффекты X_1^2 , X_2^2 . Остальные коэффициенты не являются значимыми, что указывает на доминирующую роль квадратичной зависимости от рабочего и нагрузочного давлений. Модель позволяет оценить тенденцию изменения падения давления в зависимости от режима работы гидроцилиндра. Модель (2) после исключения функций при статистически незначимых переменных приняла вид:

$$Y_2 = 35,220 + 5,810X_2 + 8,080X_1^2 + 13,580X_2^2. \quad (3)$$

Для описания зависимости ускорения штока гидроцилиндра в момент начала его движения Y_3 от комбинации исследуемых факторов (X_1 , X_2 , X_3) получена модель:

$$Y_3 = 1,440 + 0,086X_1 + 0,029X_2 - 1,190X_3 + 0,047X_1X_2 - \\ - 0,066X_1X_3 - 0,020X_2X_3 + 0,057X_1^2 - 0,131X_2^2 + 0,564X_3^2 \quad (4)$$

Коэффициент детерминации модели (4) $R^2 = 0,98$, что свидетельствует о ее достаточной предиктивной способности. F -критерий модели значим при уровне $\alpha = 0,05$ ($F_{\text{calc.}} = 135,3$ (при $F_{\text{cr.}} = 2,56$), $p < 10^{-13}$). Статистически значимыми оказались линейный эффект длительности хода штока X_3 , квадратичный эффект X_3^2 , линейный эффект рабочего давления X_1 и квадратичный эффект X_2^2 . Модель (4) после исключения функций при статистически незначимых переменных приняла следующий вид:

$$Y_3 = 1,440 + 0,086X_1 - 1,190X_3 - 0,131X_2^2 + 0,564X_3^2. \quad (5)$$

Регрессионные модели (1), (3), (5) обладают достаточной степенью точности и репрезентативности при сохранении интерпретируемости коэффициентов уравнения в рассматриваемых граничных условиях. Данные модели позволяют проводить аугментацию экспериментальных данных для предварительного обучения прогностической модели ИНС.

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные регрессионные модели (1), (3), (5) демонстрируют дифференцированную чувствительность диагностических параметров к варьируемым факторам. Высокая предиктивная способность моделей, формализующая связь исследуемых факторов на температуру масла ($R^2 = 0,99$) и ускорение штока ($R^2 = 0,98$), подтверждает адекватность выбранного факторного пространства и корректность кибернетической модели исследования. Температурный режим гидросистемы определяется совместным влиянием рабочего и нагрузочного давления, что подтверждает критическую значимость гидромеханических потерь. Проведенными

экспериментами подтверждена зависимость ускорения штока от длительности цикла нагружения, что объясняется влиянием сил трения и инерционностью гидроцилиндра в переходных режимах. Более низкая точность модели падения давления ($R^2 = 0,68$) свидетельствует о наличии дополнительных неучтенных факторов (вязкость масла, степень его загрязнения), влияние которых требует отдельного исследования.

Полученные результаты согласуются с выводами, подтверждающими значимость комплексной оценки параметров гидросистемы при диагностике ее технического состояния [8; 22; 25]. В отличие от методов имитационного моделирования и цифровых двойников, предложенный экспериментально-статистический подход учитывает реальные условия эксплуатации. По сравнению с системами поддержки принятия решений общего назначения [20; 22], предлагаемый подход обеспечивает классификацию конкретных режимов работы гидроцилиндра, что создает основу для принятия оперативных энергосберегающих решений. К числу ограничений следует отнести проведение экспериментов на одном типоразмере гидроцилиндра (RSM 161) и с одной маркой масла (ISO VG 32). При этом в качестве преимущества выделяется использование методов планирования эксперимента, обеспечивающих репрезентативность и минимизацию объема испытаний. Физическая интерпретируемость полученных моделей облегчает их интеграцию в нейросетевые алгоритмы в качестве логического ядра.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных экспериментальных исследований установлены статистически значимые зависимости трех диагностических параметров (температура масла, падение давления и ускорение штока) от варьируемых эксплуатационных факторов: рабочего и нагрузочного давления, длительности хода штока. Полученные регрессионные модели второго порядка обеспечивают дифференциацию нормального, переходного и перегруженного режимов работы гидроцилиндра жатки зерноуборочного комбайна RSM 161.

Впервые предложен комплекс интерпретируемых регрессионных моделей, формирующих информативное пространство признаков для классификации режимов гидропривода без использования трудноизмеримых диагностических показателей.

Разработанные модели могут быть использованы для создания синтетических экспериментальных данных при предобучении нейросетевых алгоритмов, что может сократить потребность в дорогостоящих натурных испытаниях. Интеграция моделей в систему поддержки принятия решений позволит своевременно информировать механизатора о приближении перегруженного режима, снижая риск отказа гидроцилиндра и топливные затраты. Перспективой дальнейших исследований является расширение номенклатуры испытуемых гидроцилиндров и марок масел, разработка физически-обоснованной нейросетевой архитектуры с использованием полученных уравнений в качестве логического ядра, а также валидация разработанной системы в реальных условиях эксплуатации зерноуборочного комбайна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зайберт А.В. Тенденции развития рынка сельскохозяйственной техники в России. *Вестник молодежной науки Алтайского государственного аграрного университета*. 2024;(2):80–83. URL: <https://www.asau.ru/vestnik-molodjozhnoj-nauki/arkhiv-nomerov> (дата обращения: 15.10.2025).
2. Limarenko N.V., Savenkov D.N., Shcherbakov A.A. Using of Digital Tools as a Means of Increasing the Efficiency of Agro-Industrial Complex. In: 2nd International Conference on Computer Applications for Management and Sustainable Development of Production and Industry (CMSD-II-2022): Proceedings SPIE 12564. Dushanbe; 2022. <http://doi.org/10.1117/12.2669259>
3. 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>
4. Комаров В.А., Курашкин М.И. Исследование работоспособности зерноуборочных комбайнов в гарантийный период. *Инженерные технологии и системы*. 2021;31(2):188–206. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202102.188-206>
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://elibrary.ru/mgbpzo>
6. Лукиенко Л.В. Анализ отказов эксплуатируемой сельскохозяйственной техники российского производства. *Агропродовольственная экономика*. 2024;(5):7–11. URL: <http://apej.ru/article/01-05-24> (дата обращения: 15.10.2025).
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://elibrary.ru/ykscqc>
8. Ионов П.А., Сенин П.В., Земсков А.М., Пьянзов С.В., Салмин В.В. Влияние марок гидравлических масел на полноту и точность диагностирования гидроагрегатов российского и зарубежного производства. *Инженерные технологии и системы*. 2023;33(3):373–387. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202303.373-387>
9. Чиганова Н.М. Приближенная оценка надежности изделий при Вейбулловском распределении отказов. *Научно-технический вестник Поволжья*. 2024;(3):137–140. URL: <https://ntvprt.ru/archive-vypuskov> (дата обращения: 29.10.2025).
10. Hwang I.-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, MultiPurpose Cultivation Tractor. *Agriculture*. 2024;14(3):416. <https://doi.org/10.3390/agriculture14030416>
11. Thomas L.C.S., Abe J.M., Leite M.V., Nääs I.A., Souza M.L.H., Gomes D.A. Smart Technologies in Poultry Production: Trends and Innovations. *Procedia Computer Science*. 2025;(270):4451–4460. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.09.570>
12. Mahapatra J., Sahni R.K., Sahoo P.K., Shrinivasa D.J. IoT-Based Real-Time Farm Management System for Smart Agriculture. In: Artificial Intelligence Techniques in Smart Agriculture. Singapore: Springer Nature Singapore; 2024. pp. 267–287. https://doi.org/10.1007/978-981-97-5878-4_16
13. Sachithra V., Subhashini L.D.C.S. How Artificial Intelligence Uses to Achieve the Agriculture Sustainability: Systematic Review. *Artificial Intelligence in Agriculture*. 2023;(8):46–59. <https://doi.org/10.1016/j.aiia.2023.04.002>
14. 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>
15. Khan T., Qiu J., Qureshi M.A.A., Iqbal M.S., Mehmood R., Hussain M.W. Agricultural Fruit Prediction Using Deep Neural Networks. *Procedia Computer Science*. 2020;(174):72–78. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.06.058>

16. Liu L.-W., Ma X., Wang Y.-M., Lu C.-T., Lin W.-S. Using Artificial Intelligence Algorithms to Predict Rice (*Oryza Sativa* L.) Growth Rate for Precision Agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021;(187):106286. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106286>
17. Monteiro A.L., Souza M.F., Lins H.A., Teófilo T.M.S., Barros Júnior A.P., Silva D.V., et al. A New Alternative to Determine Weed Control in Agricultural Systems Based on Artificial Neural Networks (ANNs). *Field Crops Research*. 2021;(263):108075. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108075>
18. Spanaki K., Karafili E., Sivarajah U., Despoudi S., Irani Z. Artificial Intelligence and Food Security: Swarm Intelligence of Agritech Drones for Smart Agrifood Operations. *Production Planning & Control*. 2021;33(16):1498–1516. <https://doi.org/10.1080/09537287.2021.1882688>
19. Трубицын Н.В., Таркинский В.Е., Подольская Е.Е. Измерительная информационная система для полевых испытаний сельскохозяйственной техники. *Техника и оборудование для села*. 2023;(8):18–20. <https://elibrary.ru/iyhpmg>
20. 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>
21. Смирнов И.Г., Хорт Д.О., Кутырев А.И. Интеллектуальные технологии и роботизированные машины для возделывания садовых культур. *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021;15(4):35–41. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-35-41>
22. 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>
23. 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>
24. Мударисов С.Г., Фархутдинов И.М., Багаутдинов Р.Ю. Обоснование параметров комбинированного сошника в цифровом двойнике методом дискретных элементов. *Инженерные технологии и системы*. 2024;34(2):229–243. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202402.229-243>
25. Sukhanov M., Syabro M., Ambartsumyan G., Moroz K., Limarenko N. Using the Simulink Simulation Package in the Practice of Creating Components of Digital Doubles of the Operating Conditions of Devices. In: IEEE 26th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). Altai: IEEE; 2025. pp. 1360–1364. <https://doi.org/10.1109/EDM65517.2025.11096844>
26. 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>
27. 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>
28. Труфляк Е.В., Скоробогачевко И.С., Коновалов В.И. Параметры и режимы работы гидравлической мини-сеялки мелкосемянных овощных культур. *Инженерные технологии и системы*. 2024;34(2):244–264. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202402.244-264>
29. Гуреев И.И., Нуралин Б.Н., Мухтаров М.У., Костюченкова О.Н. Оптимизация параметров адаптивного распылителя сельскохозяйственного опрыскивателя. *Инженерные технологии и системы*. 2024;34(1):72–87. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202401.072-087>
30. Кулиев З.В., Якубов К.Г., Алиев Э.М. Оптимизация параметров универсальной установки для измельчения кормов. *Инженерные технологии и системы*. 2025;35(1):121–138. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202501.121-138>
31. Божко И.В., Камбулов С.И., Пархоменко Г.Г., Рыков В.Б., Подлесный Д.С. Обоснование оптимальных параметров функционирования рабочего органа парового культиватора по тяговому сопротивлению. *Инженерные технологии и системы*. 2024;34(2):213–228. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202402.213-228>

32. Ожерельев В.Н., Никитин В.В. Результаты адаптации конструкции комбайна к работе с очесывающей жаткой. *Инженерные технологии и системы*. 2022;32(2):190–206. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202202.190-206>
33. Овчинников В.А., Кильмашкин Е.А., Князьков А.С., Овчинникова А.В., Жалнин Н.А., Зыкини Е.С. Разработка адаптивного центробежного рабочего органа для внесения минеральных удобрений с применением технологий быстрого прототипирования. *Инженерные технологии и системы*. 2022;32(2):222–234. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202202.222-234>
34. 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>
35. Месхи Б.Ч., Лимаренко Н.В., Жаров В.П., Шаповал Б.Г. Создание математической модели для оценки энергоемкости процесса обеззараживания стоков животноводства. *Вестник Донского государственного технического университета*. 2017;17(4):129–135. <https://doi.org/10.23947/1992-5980-2017-17-4-129-135>

REFERENCES

1. Seibert 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.) Available at: <https://www.asau.ru/vestnik-molodjznoj-nauki/arkhiv-nomerov> (accessed 15.10.2025).
2. Limarenko N.V., Savenkov D.N., Shcherbakov A.A. Using of Digital Tools as a Means of Increasing the Efficiency of Agro-Industrial Complex. In: 2nd International Conference on Computer Applications for Management and Sustainable Development of Production and Industry (CMSD-II-2022): Proceedings SPIE 12564. Dushanbe; 2022. <http://doi.org/10.1117/12.2669259>
3. 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/10.15507/26584123.030.202001.008-020>
4. Komarov V.A., Kurashkin M.I. Studying the Normal Operation of Grain Harvesters within the Warranty Period. *Engineering Technologies and Systems*. 2021;31(2):188–206. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202102.188-206>
5. Chavvykin 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://elibrary.ru/mgbpzo>
6. Lukienko L.V. Analysis of Failures of Russian-Made Agricultural Machinery in Operation. *Agroprodovol'stvennaya ekonomika*. 2024;(5):7–11. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <http://apej.ru/article/01-05-24> (accessed 15.10.2025).
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://elibrary.ru/ykscqc>
8. Ionov P.V., Senin P.V., Zemskov A.M., Pyanzov S.V., Salmin V.V. Influence of Hydraulic Oil Brands on the Completeness and Accuracy of Diagnostics of Hydraulic Units of Russian and Foreign Production. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(3):373–387. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202303.373-387>
9. Chiganova N.M. [An Approximate Assessment of the Product Reliability with a Weibull Distribution of Failures]. *Scientific and Technical Volga Region Bulletin*. 2024;(3):137–140. (In Russ.) Available at: <https://ntvprt.ru/ru/archive-vypuskov> (accessed 29.10.2025).
10. Hwang I.-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, MultiPurpose Cultivation Tractor. *Agriculture*. 2024;14(3):416. <https://doi.org/10.3390/agriculture14030416>

11. Thomas L.C.S., Abe J.M., Leite M.V., Nääs I.A., Souza M.L.H., Gomes D.A. Smart Technologies in Poultry Production: Trends and Innovations. *Procedia Computer Science*. 2025;(270):4451–4460. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.09.570>
12. Mahapatra J., Sahni R.K., Sahoo P.K., Shrinivasa D.J. IoT-Based Real-Time Farm Management System for Smart Agriculture. In: *Artificial Intelligence Techniques in Smart Agriculture*. Singapore: Springer Nature Singapore; 2024. pp. 267–287. https://doi.org/10.1007/978-981-97-5878-4_16
13. Sachithra V., Subhashini L.D.C.S. How Artificial Intelligence Uses to Achieve the Agriculture Sustainability: Systematic Review. *Artificial Intelligence in Agriculture*. 2023;(8):46–59. <https://doi.org/10.1016/j.aiaa.2023.04.002>
14. Pronin S.P., Zryumova A.G., Piletsky A.A., Belyaev V.I. Intellectual Assessment of Wheat Yield through the Variable Potential of Seeds. *Engineering Technologies and Systems*. 2025;35(3):443–464. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202503.443-464>
15. Khan T., Qiu J., Qureshi M.A.A., Iqbal M.S., Mehmood R., Hussain M.W. Agricultural Fruit Prediction Using Deep Neural Networks. *Procedia Computer Science*. 2020;(174):72–78. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.06.058>
16. Liu L.-W., Ma X., Wang Y.-M., Lu C.-T., Lin W.-S. Using Artificial Intelligence Algorithms to Predict Rice (*Oryza Sativa* L.) Growth Rate for Precision Agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021;(187):106286. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106286>
17. Monteiro A.L., Souza M.F., Lins H.A., Teófilo T.M.S., Barros Júnior A.P., Silva D.V., et al. A New Alternative to Determine Weed Control in Agricultural Systems Based on Artificial Neural Networks (ANNs). *Field Crops Research*. 2021;(263):108075. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108075>
18. Spanaki K., Karafili E., Sivarajah U., Despoudi S., Irani Z. Artificial Intelligence and Food Security: Swarm Intelligence of Agritech Drones for Smart Agrifood Operations. *Production Planning & Control*. 2021;33(16):1498–1516. <https://doi.org/10.1080/09537287.2021.1882688>
19. 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://elibrary.ru/iyhpmg>
20. 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>
21. Smirnov I.G., Khort D.O., Kutryev A.I. Intelligent Technologies and Robotic Machines for Garden Crops Cultivation. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2021;15(4):35–41. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-35-41>
22. 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>
23. 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/10.26897/2687-1149-2023-5-46-51>
24. Mudarisov S.G., Farkhutdinov I.M., Bagautdinov R.Yu. Justification of Dual-Level Opener Parameters in Digital Twin by the Discrete Element Method. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(2):229–243. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202402.229-243>
25. Sukhanov M., Syabro M., Ambartsumyan G., Moroz K., Limarenko N. Using the Simulink Simulation Package in the Practice of Creating Components of Digital Doubles of the Operating Conditions of Devices. In: *IEEE 26th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM)*. Altai: IEEE; 2025. pp. 1360–1364. <https://doi.org/10.1109/EDM65517.2025.11096844>
26. 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. Korkov*. 2024;(1):88–98. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.55196/2411-3492-2024-143-88-98>

27. 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/tid.2022.05.pp.012-025>
28. Truflyak E.V., Skorobogachenko I.S., Kononov V.I. Parameters and Modes of a Hydraulic Mini Seeder Operation for Small-Seeded Vegetable Crops. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(2):244–264. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202402.244-264>
29. Gureev I.I., Nuralin B.N., Mukhtarov M.U., Kostyuchenkova O.N. Optimization of Parameters of Adaptive Spray System for Agricultural Sprayer. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(1):72–87. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202401.072-087>
30. Quliyev Z.V., Yaqubov K.G., Aliev E.M. Optimizing the Parameters of a Universal Unit for Fodder Grinding. *Engineering Technologies and Systems*. 2025;35(1):121–138. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202501.121-138>
31. Bozhko I.V., Kambulov S.I., Parkhomenko G.G., Rykov V.B., Podlesny D.S. Justification of Optimal Operating Parameters of the Field Cultivator Tool through Determining Traction Resistance. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(2):213–228. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202402.213-228>
32. Ozherelev V.N., Nikitin V.V. The Results of the Combine Design Adaptation to Work with a Stripper Header. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(2):190–206. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202202.190-206>
33. Ovchinnikov V.A., Kilmyashkin E.A., Knyazkov A.S., Ovchinnikova A.V., Zhalnin N.A., Zykin E.S. Development of an Adaptive Centrifugal Working Tool for Mineral Fertilization Using Rapid Prototyping Technologies. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(2):222–234. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202202.222-234>
34. Kataev Yu.V., Zagoruiko M.G., Tishaninov I.A., Gradov E.A. Prediction of Failures in Agricultural Machinery Engines Using Digital Technologies. *The Agrarian Scientific Journal*. 2022;(2):79–82. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.28983/asj.y2022i2pp79-82>
35. Meskhi B.C., Limarenko N.V., Zharov V.P., Shapoval B.G. Creation of a Mathematical Model for Assessing the Energy Intensity of the Livestock Wastewater Disinfection Process. *Vestnik of Don State Technical University*. 2017;17(4):129–135. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.23947/1992-5980-2017-17-4-129-135>

Об авторах:

Лимаренко Николай Владимирович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры приборостроения и биомедицинской инженерии, главный научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории RSM-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 RSM-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

Суханов Максим Константинович, аспирант кафедры приборостроения и биомедицинской инженерии, научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории RSM-Star института перспективного машиностроения Донского государственного технического университета (344000, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3363-6349>, Researcher ID: LVS-4135-2024, suhanov_mk@mail.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.

М. К. Суханов – 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 20.01.2026; поступила после рецензирования 16.02. 2026;
принята к публикации 27.02.2026*

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, 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

Maxim K. Sukhanov, Post-Graduate Student of the Department of Instrumentation and Biomedical Engineering, Researcher 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/0009-0006-3363-6349>, Researcher ID: LVS-4135-2024, suhanov_mk@mail.ru

Authors contribution:

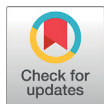
N. V. Limarenko – controlling and mentoring the study planning and conducting; formulating the study ideas, aims and objectives; preparing and presenting the manuscript, specifically visualizing and presenting the data.

D. N. Savenkov – conducting the study, specifically performing the experiments, collecting data; preparing and presenting the manuscript, specifically visualizing and presenting the data.

M. K. Sukhanov – 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 20.01.2026; revised 16.02. 2026; accepted 27.02.2026

МАШИНОСТРОЕНИЕ /
MECHANICAL ENGINEERING<https://doi.org/10.15507/2658-4123.26363.644-661>EDN: <https://elibrary.ru/yhzmzr>

УДК / UDK 631.312.02+631.51:004.9

*Оригинальная статья / Original article***Design and Evaluation of an Intelligent Hydraulic Protection System for Subsoiler Plows in Rocky Soil****I. R. Antypas***Don State Technical University,**Rostov-on-Don, Russian Federation, <https://ror.org/00x5je630>*✉ Imad.antypas@mail.ru*Abstract*

Introduction. Subsoilers operating in rocky soils are subjected to high dynamic and shock loads, leading to damage to working bodies, reduced reliability, and decreased productivity. Traditional mechanical protection systems fail to provide an adaptive response to overloads.

Aim of the Study. The article is aimed at designing and evaluating experimentally the effectiveness of an intelligent closed-loop hydraulic system for automatic protection of a subsoiler against shock loads in rocky soils.

Materials and Methods. The article presents a hydraulic schematic and a physical model of the implement. The system comprises a pump, a pilot-operated check valve, a four-way electro-hydraulic directional valve, a pressure sensor, a double-acting cylinder, and a relief valve. Control is implemented via a closed loop with a draft force threshold of 28 kN. Performance was evaluated using C++ simulation, field trials with MATLAB data acquisition, and comparative analysis with a spring safety system.

Results. Simulations and field trials confirmed the control logic functionality. Compared to the spring system, the hydraulic system demonstrated a 10 % weight reduction, a 11 % higher field performance, a 14 % lower hourly fuel consumption, and a 40 % faster response time (from 3.0 to 1.8 s). There was determined a linear correlation between system pressure and draft force validating the component selection. The automatic response reduces mechanical loads on the frame and working body, while smooth valve control minimizes harmful transients.

Conclusion. The developed hydraulic protection system is effective and technically feasible. It provides automatic protection of the subsoiler under overload conditions, reducing mechanical stresses. The mathematical analysis has confirmed the component selection correctness, and closed-loop control enhances reliability. The system has potential for further development with the use of advanced electronic control systems and digital sensors.

Keywords: hydraulic circuit, rocky soil, plow, valve, tillage, reliability (safety), computer simulation

© Antypas I.R., 2026



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 author declare no conflict of interest.

For citation: Antypas I.R. Design and Evaluation of an Intelligent Hydraulic Protection System for Subsoiler Plows in Rocky Soil. *Engineering Technologies and Systems*. 2026;36(3):644–661. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.26363.644-661>

Проектирование и оценка интеллектуальной гидравлической системы защиты для глубокорыхлителей на каменистых почвах

И. Р. Антибас

*Донской государственный технический университет,
г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация, <https://ror.org/00x5je630>*

✉ Imad.antypas@mail.ru

Аннотация

Введение. Глубокорыхлители, работающие на каменистых почвах, подвергаются высоким динамическим и ударным нагрузкам, что приводит к повреждению рабочих органов, снижению надежности и производительности. Традиционные механические системы защиты не обеспечивают адаптивной реакции на перегрузки.

Цель исследования. Разработка и экспериментальная оценка эффективности интеллектуальной гидравлической системы замкнутого управления для автоматической защиты глубокорыхлителя от ударных нагрузок на каменистых почвах.

Материалы и методы. В работе представлена принципиальная гидравлическая схема и физическая модель орудия. Система включает насос, пилотный обратный клапан, четырехходовой электрогидравлический распределитель, датчик давления, двусторонний гидроцилиндр и предохранительный клапан. Управление реализовано по замкнутому контуру с пороговым значением тягового усилия 28 кН. Оценка эффективности проводилась с использованием C++-моделирования, полевых испытаний с регистрацией данных в MATLAB и сравнительного анализа с пружинной системой защиты.

Результаты исследования. Моделирование и полевые испытания подтвердили работоспособность логики управления. В сравнении с пружинной гидравлическая система показала снижение массы на 10 %, повышение полевой эффективности на 11 %, снижение часового расхода топлива на 14 % и сокращение времени реакции на 40 % (с 3,0 до 1,8 с). Установлена линейная корреляция между давлением в системе и тяговым усилием, что подтверждает корректность выбора компонентов. Автоматический характер срабатывания системы снижает механические нагрузки на раму и рабочий орган, а плавное управление клапаном минимизирует опасные переходные процессы.

Заключение. Разработанная гидравлическая система защиты является эффективной и технически обоснованной. Она обеспечивает автоматическую защиту глубокорыхлителя при перегрузках, снижая механические напряжения. Математический анализ подтвердил правильность выбора компонентов, а замкнутое управление повысило надежность. Система имеет потенциал для дальнейшего развития с использованием более совершенных электронных систем управления и цифровых датчиков.

Ключевые слова: гидравлическая схема, каменистая почва, плуг, клапан, почвообработка, надежность, компьютерное моделирование

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Антибас И.Р. Проектирование и оценка интеллектуальной гидравлической системы защиты для глубокихрыхлителей на каменистых почвах. *Инженерные технологии и системы*. 2026;36(3):644–661. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.26363.644-661>

INTRODUCTION

The design and implementation of intelligent protection systems is a key area of development for modern agricultural and earth-moving machinery, especially for equipment operating in extreme conditions. A subsoiler plow, which is tasked with breaking up compacted soil layers, encounters high dynamic and shock loads when operating in rocky soils. This leads to the risk of damage to the working tool and frame components, increased wear, frequent maintenance stops, and, consequently, a significant reduction in productivity and an increase in operational costs.

Despite extensive research on hydraulic systems for agricultural machinery, the behavior of subsoiler plows under extreme shock loads in rocky soils remains insufficiently understood. In particular, there is a lack of quantitative data on the dynamic response of working tools during collisions with solid obstacles, as well as on the transient processes that occur in hydraulic circuits under such conditions. Existing studies have primarily focused on steady-state performance, energy efficiency, and component reliability, while the transient dynamics of electro-hydraulic protection systems during impact events have received limited attention.

Furthermore, the interaction between hydraulic parameters (pressure, flow rate) and the mechanical response of the plow (lifting speed, depth recovery) under varying soil conditions has not been systematically investigated. This gap prevents the optimal calibration of protection thresholds and limits the development of truly adaptive systems. Without a clear understanding of these dynamic relationships, it is difficult to design a protection system that balances rapid response with smooth actuation, thereby avoiding both structural damage and unnecessary interruptions.

Traditional protection systems, based on mechanical shear elements or hydraulic circuits with a fixed pressure threshold, have significant drawbacks. They provide only a single-use, passive response, requiring subsequent operator intervention to resume work, or they inefficiently dissipate energy when damping an impact. However, the fundamental limitation of these approaches is their inability to adapt to varying soil conditions and impact intensities, as they rely on predetermined thresholds that do not account for the real-time dynamics of the obstacle encounter.

To address these gaps, the present study focuses on developing an intelligent hydraulic protection system that incorporates real-time feedback control. The key novelty lies in the integration of a closed-loop control strategy that continuously monitors draft force and adjusts the plow position instantaneously, enabling both rapid protection and automatic recovery. This approach is expected to provide a more comprehensive solution than existing systems by combining fast response, smooth actuation, and operational autonomy.

Thus, the objective of this work is to design, model, and experimentally evaluate the effectiveness of an intelligent hydraulic protection system for a subsoiler plow

intended for operation in rocky soils. To achieve this objective, the following tasks were accomplished: development of a schematic diagram and design of the hydraulic protection system; development of a mathematical model and computer simulation of the system dynamics; experimental validation of the system performance through field trials.

The expected scientific and practical result of the work is a well-founded system design and operating algorithm that will increase the reliability and service life of the subsoiling unit, reduce downtime, and enhance labor productivity when cultivating complex rocky soils.

LITERATURE REVIEW

Previous research on hydraulic systems for agricultural machinery has established a solid foundation for understanding component behavior and overall system performance. Researchers from the USA demonstrated the importance of collecting operational data from tractor hydraulic systems for analyzing machine performance and improving energy efficiency [1]. Their work showed that precise measurement and control are essential for optimizing hydraulic power delivery. However, their study focused primarily on steady-state operation, leaving the transient response during shock loads unexplored.

In the area of hydraulic circuit modeling, there were applied lumped parameter methods to evaluate the impact of flow and pressure changes on the efficiency of agricultural equipment [2]. While their approach provided valuable insights into system design and performance, it did not address the dynamic behavior under impact conditions. Similarly, scientists from China developed pressure control methods for electro-hydraulic hitch systems in electric tractors, demonstrating improvements in traction efficiency [3]. Nevertheless, their work did not consider the protection of working tools against sudden overloads, which is a critical requirement for implements operating in rocky soils.

The need for diagnostic tools has been addressed by A. P. Miller and K. G. Pugin, who showed that monitoring hydraulic cylinders can reveal internal leaks and faults before they occur [4; 5]. While their research enhanced operational reliability, it focused on preventive maintenance rather than real-time protective response. Additional contributions have been made to the study of the reliability of hydraulic systems reliability, yet their studies did not explore adaptive control strategies for overload protection [6; 7]. D. V. Sychev, N. N. Trushin and S. N. Rednikov examined the evolution of hydraulic drives, highlighting the trend toward improved reliability, but they did not specifically address the challenge of shock load mitigation in tillage implements [8].

Regarding modeling and simulation, A. Y. Popov developed simulation models for positive displacement pumps and hydraulic drives to study system response and improve energy efficiency [9]. While this work demonstrated the power of simulation as a design tool, it did not incorporate the dynamic interaction between the hydraulic circuit and the mechanical structure of the implement. Chinese researchers explored electro-hydraulic control of hitch systems, focusing on optimizing tillage depth and traction speed for overall efficiency [10; 11]. These studies, however, assumed relatively

uniform soil conditions and did not account for the sudden resistance changes caused by rocks or other obstacles.

More recent work on intelligent agricultural systems has introduced advanced control techniques. A. Navone, M. Martini and M. Chiaberge reviewed autonomous robotic pruning, demonstrating the potential of intelligent control for precision agriculture [12]. A team of scientists from Switzerland developed calibrated dynamic models for force estimation in hydraulic machinery, showing the feasibility of integrating control systems with real-time feedback [13]. However, their applications were limited to relatively low-speed, predictable operations, unlike the high-impact conditions encountered in deep tillage.

Despite these advances, a critical gap remains: no existing system integrates closed-loop pressure feedback with fast-acting electro-hydraulic valves to provide simultaneous overload protection and automatic depth recovery. Research has focused on energy efficiency and leakage compensation [14; 15], as well as high-pressure systems for stationary applications [16; 17]. Although overall efficiency and dynamic modeling have been analyzed [18; 19], the specific issue of protecting tillage implements from impact loads on rocky soils has not been addressed.

In summary, while the literature provides a comprehensive understanding of hydraulic system design, modeling, and control, it does not sufficiently address the dynamic protection requirements for subsoilers operating in rocky soils. The transient behavior during obstacle impacts, the interaction between hydraulic and mechanical responses, and the integration of closed-loop adaptive control remain underexplored.

MATERIALS AND METHODS

Objects of Study

The objects of this study are: the subsoiler plow (chisel plow) operating on rocky soils, which serves as the mechanical implement requiring protection from shock loads; the hydraulic protection system designed to automatically lift the plow upon detection of overload conditions; and the dynamic interaction between the hydraulic circuit parameters (pressure, flow rate) and the mechanical response of the plow (lifting speed, depth recovery) under variable soil conditions. The study focuses on the transient behavior of the system during impact events, specifically when the draft force exceeds the critical threshold of 28 kN.

Equipment

The following materials and components were used in the development of the hydraulic protection system. A hydrostatic positive displacement pump (gear type) with a displacement of 16 cm³/rev, capable of delivering a constant flow rate of 45.42 L/min at a nominal speed of 2,800 min⁻¹ and a maximum operating pressure of 21 MPa, was employed as the hydraulic pump 3 (Fig. 1). The directional control valve system comprised two main components: a pilot-operated check valve 4 (Fig. 1) with a cracking pressure of 0.35 MPa, which allows fluid flow in one direction and prevents reverse flow unless a pilot pressure signal is applied; and a four-way electro-hydraulic directional control valve 5 (Fig. 1) with a flow capacity of 45.42 L/min and a maximum operating pressure of 21 MPa.

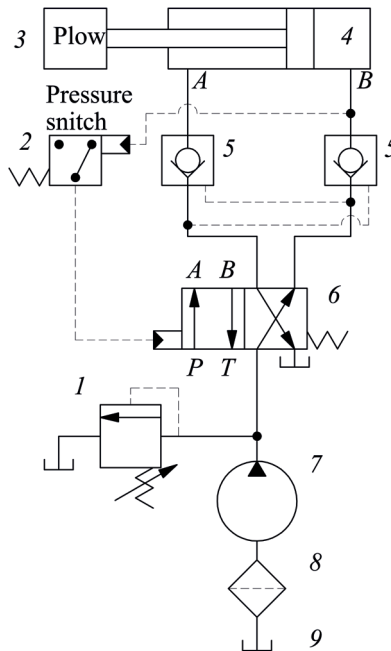


Fig. 1. Hydraulic circuit of the designed protection system:

- 1 – an additional protection element in the form of a pressure relief valve;
- 2 – sensitive electrical pressure switch; 3 – the plow; 4 – double-acting hydraulic cylinder;
- 5 – pilot-operated check valve; 6 – four-way directional control valve with electromagnetic actuation;
- 7 – positive displacement hydraulic pump; 8- oil filter; 9 hydraulic fluid reservoir

Note: *P* – pressure line (supply from pump); *T* – tank line (return to reservoir); *A* and *B* – working ports connected to the cylinder (*A* – rod end, *B* – cap end).

Source: The figures 1, 2, 6, 7 are compiled by the authors using Compass program.

This valve is solenoid-actuated and spring-centered, featuring a “wet armature” coil design for improved cooling and performance stability. The internal anatomy of the valve and spool position are shown in Figure 2, the operating principle of the electromagnetic actuation mechanism is illustrated in Figure 3, and the valve used in the circuit is displayed in Figure 4.

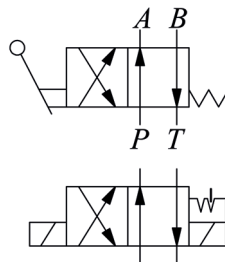


Fig. 2. Internal anatomy of the valve and spool position

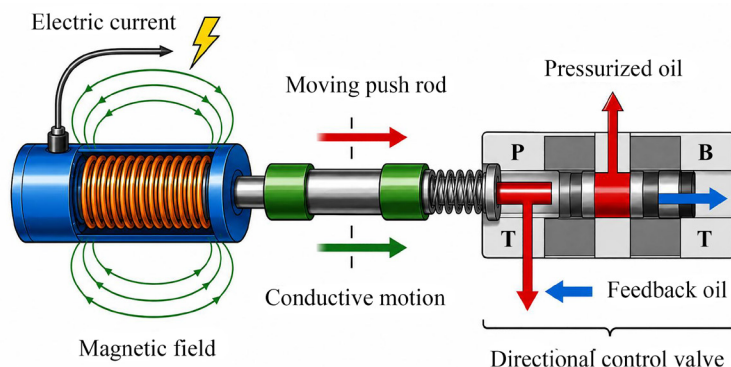


Fig. 3. Operating principle of the electromagnetic actuation mechanism

Source: Figures 3, 4 are prepared by the author based on hydraulic engineering references¹.

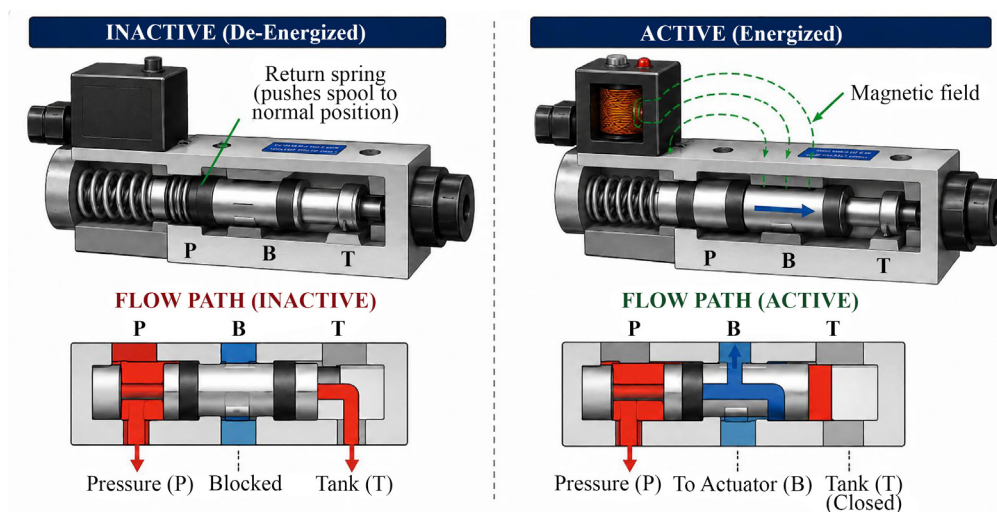


Fig. 4. Valve used in the hydraulic circuit

A sensitive electrical pressure switch 6 with an adjustable setpoint range of 5–30 MPa, accuracy of $\pm 0.5\%$, and a response time of less than 20 ms was used as the pressure sensor. The hydraulic actuator was a double-acting cylinder 7 with a piston diameter of 50 mm, a rod diameter of 28 mm, a stroke length of 200 mm, and a maximum operating pressure of 21 MPa, designed to generate an extension force of approximately 41 kN and a retraction force of approximately 28 kN at nominal pressure; the cylinder is shown in Figure 5.

¹ Parr A. Hydraulics and Pneumatics: A Technician's and Engineer's Guide. Oxford: Butterworth Heinemann; 2011. 238 p.; Esposito A. Fluid Power with Applications. Upper Saddle River: Pearson Education. 2014. 248 p.

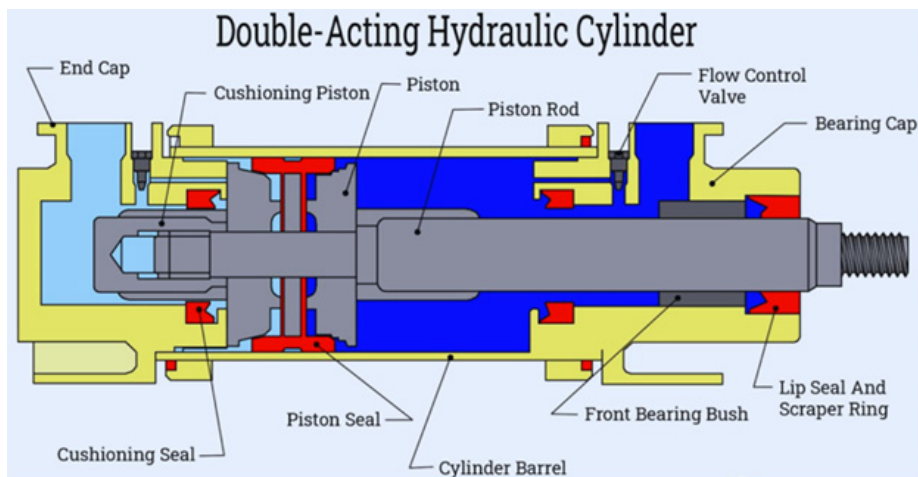


Fig. 5. Double-acting hydraulic cylinder: Piston diameter 50 mm, rod diameter 28 mm, stroke length 200 mm²

A direct-acting pressure relief valve 9 calibrated to 23 MPa served as the primary safety element. ISO VG 46 mineral oil with a viscosity index of 95 was used as the hydraulic fluid. For measurement and data acquisition, the following equipment was employed: a strain gauge load cell with a range of 0–50 kN for draft force measurement; a pressure transducer with a range of 0–35 MPa for hydraulic pressure monitoring; an NI cDAQ-9189 data acquisition system with a sampling rate of 1,000 Hz; and a laptop with MATLAB R2022a for data logging and analysis. The test tractor was an MTZ-1221 (Belarus) with a rated power of 130 hp and a standard hydraulic system with a flow rate of 60 L/min at 18 MPa.

Methods

The following methodology was employed to design, simulate, and evaluate the proposed hydraulic protection system. The hydraulic circuit schematic (Fig. 1) was developed using AutoCAD Electrical, and component selection was based on force calculations derived from preliminary field measurements of draft forces under rocky soil conditions. A threshold value of 28 kN was established according to the structural strength limits of the subsoiler frame and working tool. Hydraulic and electronic components were selected to ensure rapid response, precise control, and reliable operation under harsh field conditions. Figure 1 illustrates the complete hydraulic circuit. A simplified mathematical model was formulated to describe the relationship between draft force F , hydraulic pressure P , and valve state.

The control logic of the hydraulic circuit was first verified through computational simulation using a custom program developed in C++. The program implemented the mathematical model to evaluate the relationship between draft force, hydraulic pressure, and valve operation. For draft forces below 28 kN, the calculated hydraulic

² Sea HydroSystems. How Does a Double-Acting Hydraulic Cylinder Work? 2024. Available at: <https://seahydrosys.com/double-acting-hydraulic-cylinder-work> (accessed 03.03.2025).

pressure remained within the normal operating range. When the applied draft force reached or exceeded the threshold, the program generated an activation signal for the protection system, confirming the correctness of the control logic before experimental implementation.

The dynamic performance of the system was subsequently evaluated through field experiments conducted on a test plot with rocky soil containing approximately 15–20% rocks by volume, with particle sizes ranging from 50 to 200 mm. The subsoiler operated at depths of 3–6 (baseline), 20 and 40 cm, while maintaining a constant forward speed of 3.8 km/h. Each operating depth was tested for at least 30 min, with three replications.

Draft force and hydraulic pressure were continuously recorded at a sampling frequency of 1,000 Hz using a strain-gauge load cell (0–50 kN), a pressure transducer (0–35 MPa), and an NI cDAQ-9189 data acquisition system. All overload events (draft force ≥ 28 kN) were recorded, including system activation time, hydraulic cylinder response time, and recovery time. The acquired signals were filtered using a low-pass Butterworth filter with a 20 Hz cutoff frequency to eliminate high-frequency noise and were subsequently analyzed and visualized in MATLAB R2022a.

Finally, the performance of the proposed hydraulic protection system was compared with that of a conventional spring-based mechanical protection system under identical field conditions. The evaluated performance indicators included system weight, response time, field efficiency, and fuel consumption. Response time was defined as the interval between the draft force exceeding 28 kN and the initiation of hydraulic cylinder retraction. Field efficiency was calculated as the ratio of effective working time to the total operating time, whereas fuel consumption was measured using the tractor's onboard fuel flow meter. There was conducted the statistical analysis, including calculation of the mean, standard deviation, and paired t -test ($p < 0.05$), to compare the two protection systems. In addition, regression analysis was conducted to quantify the linear relationship between hydraulic pressure and draft force.

Research Procedure

The study was conducted in seven sequential stages. Stage 1 involved preliminary field measurements, during which the subsoiler was operated on the test plot at depths of 20 and 40 cm without a protection system. Draft force was recorded at 1,000 Hz over a total operating time of 3 h. The collected data were analyzed to determine the typical draft force range and peak loads during obstacle encounters, and a threshold value of 28 kN was established as the activation limit for the protection system.

In the second stage focused on hydraulic circuit design and component selection. Based on the measured draft forces, the hydraulic circuit (Fig. 1) was designed, hydraulic and electronic components were selected and sized according to the required performance specifications, and the circuit was simulated using the developed C++ model to verify control logic and component compatibility. Valve timing and pressure settings were subsequently optimized based on the simulation results.

Stage three, the hydraulic system was fabricated and assembled. All components were installed on the test frame, the double-acting hydraulic cylinder 7 was connected to the plow lifting mechanism, and the pressure switch 6 was calibrated to activate at 28 kN (approximately 14.3 MPa, based on the effective cylinder area). The electrical control circuit was then wired, tested, and validated through preliminary bench experiments to ensure correct valve switching and cylinder operation.

At the fourth stage consisted of field testing of the hydraulic protection system. The assembled system was installed on an MTZ-1221 tractor, and the subsoiler was operated at depths of 3–6 (baseline), 20 and 40 cm at a constant forward speed of 3.8 km/h. Each operating depth was evaluated for at least 30 min with three replications. Draft force and hydraulic pressure were continuously recorded at 1,000 Hz, while all overload events (draft force ≥ 28 kN) were logged together with system activation time, cylinder response time, and recovery time.

At the fifth stage, comparative experiments were carried out using a conventional spring-based mechanical protection system. After replacing the hydraulic system with the mechanical system, the same experimental procedure was repeated under identical soil and weather conditions. Performance indicators, including system weight, response time, field efficiency, and fuel consumption, were recorded for comparison.

Stage six involved data processing and statistical analysis. The recorded signals were imported into MATLAB R2022a, filtered using a low-pass Butterworth filter with a 20 Hz cutoff frequency, and analyzed to determine response time, field efficiency, and fuel consumption. Response time was defined as the interval between the draft force exceeding 28 kN and the initiation of hydraulic cylinder retraction. Statistical analysis, including the calculation of the mean, standard deviation, and t -test ($p < 0.05$), was performed to compare the hydraulic and mechanical protection systems.

Finally, stage seven focused on validation of the proposed system. Regression analysis was used to evaluate the relationship between hydraulic pressure and draft force, while the experimental results were used to verify the hypothesis that the proposed electro-hydraulic closed-loop system provides faster and more reliable overload protection than the conventional mechanical system. The overall system performance, limitations, and recommendations for future development were then established.

Circuit Operation Mechanism. Normal operation mode ($F < 28$ kN)

During normal operation, when the measured draft force remains below the threshold value of 28 kN, the solenoid coil of the four-way directional control valve 5 (Fig. 1) remains energized. Pressurized oil supplied by the hydraulic pump 3 (Fig. 1) flows from port P to port B of the valve and then enters the cap end of the hydraulic cylinder 7, causing the cylinder to extend and maintain the subsoiler 8 in its working position. Simultaneously, oil from the rod end of the cylinder returns through port A to port T and is discharged into the reservoir 1 (Fig. 1). Figure 6 illustrates the hydraulic flow paths and energy transfer during this operating condition.

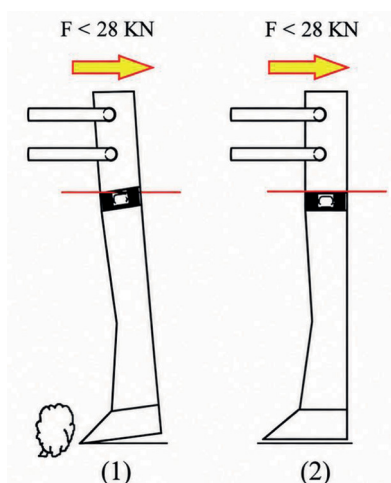


Fig. 6. Operation of the protection circuit in the normal state (No Overload):

- 1) – hydraulic pump, which supplies pressurized oil to the system;
- 2) – four-way directional control valve, which, in its energized state, directs the oil flow to the cap end of the hydraulic cylinder.

Note: T – low pressure; P – high pressure; (1) – hydraulic pump, which supplies pressurized oil to the system; (2) – four-way directional control valve, which, in its energized state, directs the oil flow to the cap end of the hydraulic cylinder.

Protection mode during overload ($F \geq 28 \text{ kN}$)

When the sensor 6 (item) detects that the draft force reaches or exceeds the threshold value of 28 kN – due to the plow hitting a solid obstacle – the control unit immediately cuts off the electrical current to the four-way valve's solenoid coil 5 (Fig. 1). The loss of magnetic force causes the internal return spring to move the spool back to its default (center) position. This shift changes the path of the pressurized oil; it now flows from port P to port A , entering the upper end (rod end) of the cylinder. Consequently, the cylinder retracts rapidly, pulling the plow arm upward in a quick lifting motion. This action immediately reduces the penetration depth, thereby lowering the draft force to a safe level and avoiding potential damage. During this process, oil is drained from the lower end (cap end) of the cylinder via port B to port T . Figure 7 shows the detailed schematic of fluid flow and component movement in this protection state. The circuit automatically returns to normal operation mode (Fig. 6) once the measured draft force falls back below the critical threshold.

This sequence corresponds to positions (1), (2), and (3) in the diagram: At position (3), the draft force reaches the limit of $F \geq 28 \text{ kN}$. The plow experiences excessive soil resistance, and hydraulic pressure rises to the threshold value. The pressure switch 6 detects this increase and is triggered. No mechanical movement occurs yet – this is the sensing stage, shown on the diagram as the point where the force arrow indicates $F \geq 28 \text{ kN}$, typically marked in red as a warning zone.

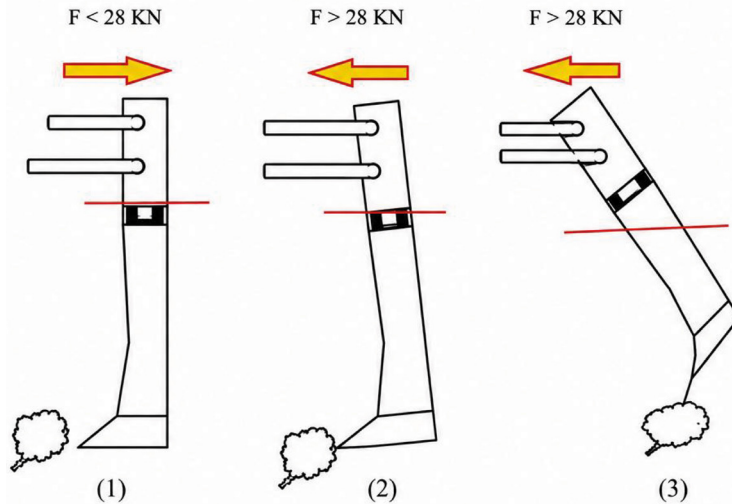


Fig. 7. Operation of the protection circuit during increased force (Overload)

At position (2), the pressure switch generates an electrical control signal and sends it to the solenoid coil of valve 5 (Fig. 1). This signal de-energizes (turns off) the solenoid, which stops holding the valve spool in its shifted position. On the diagram, this is represented by a dashed or dotted line (electrical connection) going from the pressure switch to the solenoid of the valve. This is the control stage.

At position (3), after the solenoid is de-energized, the spring mechanism inside valve 5 (Fig. 1) pushes the spool back to its central (neutral) spring-centered position. Now the hydraulic flow changes direction: high-pressure oil flows from the pump (port *P*) to port *A*, entering the rod end of the cylinder. The piston rod retracts (pulls in), which lifts the plow upward. Oil from the cap end of the cylinder is pushed out through port *B* and returns to the reservoir via port *T*. This is the actuation stage – the plow is automatically raised to prevent damage from overload.

In terms of hydraulic line colors: at position (1), the entire system is under pressure with no return flow yet. At position (3), the pressure line (red) goes from *P* to *A* to retract the cylinder, while the return line (blue) goes from *B* to *T* to drain oil back to the reservoir. The dashed signal line at position (2) represents the electrical control path.

To summarize the entire sequence: the plow works normally with force below 28 kN, the valve is energized, the cylinder extends, and the plow is lowered. When soil resistance increases and force reaches 28 kN at position (1), the pressure switch sends a signal at position (2), the solenoid is de-energized, the valve spring returns the spool to center at position (3), oil flows from *P* to *A*, the cylinder retracts, the plow lifts, and oil returns from *B* to *T* to the reservoir. This protects the plow from overload damage.

When draft force reaches 28 kN, the pressure switch 2 sends a signal to de-energize the solenoid of valve 5 (Fig. 1). The valve spool returns to its center (spring-centered) position, redirecting flow from port *P* to port *A*, retracting the cylinder and lifting the plow. Oil from the cap end returns to the reservoir via port *B* to port *T* (Fig. 6).

RESULTS

Figure 8 shows the time-series data of draft force recorded during field trials at different plowing depths.

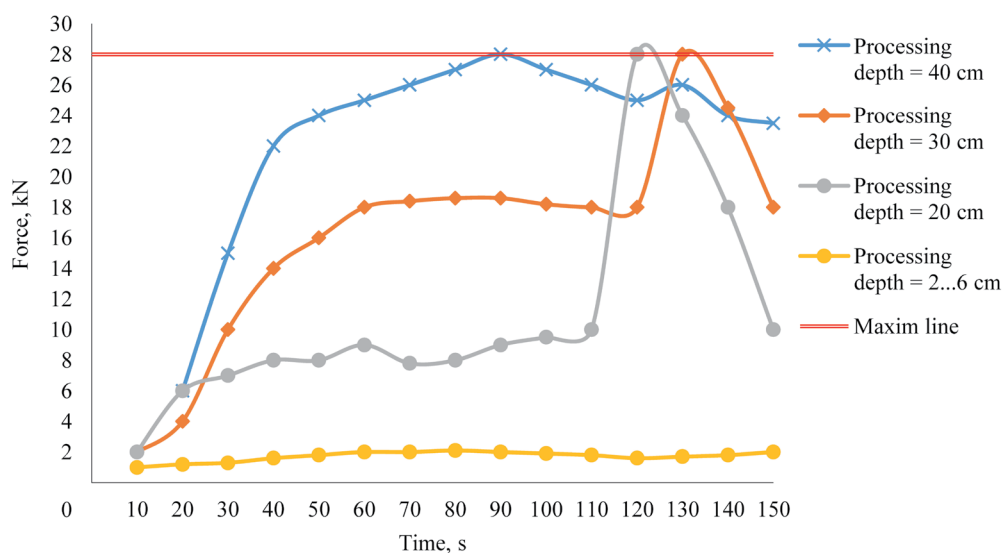


Fig. 8. Relationship between force and time at different plowing depths

Source: The figure 8 is compiled by the authors using software Microsoft Excel.

At a shallow depth (3–6 cm), the draft force recorded a stable and regular pattern, with a mean value of 12.5 ± 2.1 kN. At a depth of 20 cm, the mean draft force was 22.3 ± 3.4 kN; at the 110-second mark, a sharp increase to 31.6 kN was recorded due to the plow striking a stone. The force exceeded the critical threshold of 28 kN, and the system responded by lifting the plow within 1.8 seconds. After the obstacle was passed, the system automatically returned the plow to the working depth. At a depth of 40 cm, the mean draft force was 34.8 ± 4.2 kN; impact with another stone caused the draft force to rise to 42.3 kN. The system responded within 1.7 seconds, mitigating the shock and protecting the components. The mean system response time across all overload events was 1.8 ± 0.2 s.

A quantitative comparison was conducted between the performance of the plow equipped with the hydraulic protection system and a traditional system relying on mechanical protection via springs. Table summarizes the comparison results.

The intelligent protection system resulted in a 10% reduction in total weight (from 260 to 235 kg), a 26% increase in operating speed (from 2.8 to 3.8 km/h), and an 11% increase in field efficiency (from 1.20 to 1.35 ha/h). The mean response time decreased to 1.8 seconds, compared to 3.0 seconds in the spring-based system, representing a 40% improvement. The system also led to an 8% reduction in energy consumption (from 48.2 to 44.2 kWh) and a 14% reduction in specific fuel consumption (from 10.2 to 8.5 kg/ha).

Table

Comparison between mechanical and hydraulic protection systems

Indicators	Values of Indicators		
	Tractor	Mechanical System	Hydraulic System
Weight, kg	3,000	260	235
Working width, m	–	0.54	0.54
Operating speed, km/h	–	2.8	3.8
Response time, s	–	3.0	2.2
Field efficiency, ha/h	–	1.20	1.35
Hourly energy consumption, kW/h	–	48.2	44.2
Hourly fuel consumption, kg/ha	–	10.2	8.5

Source: The table was compiled by the author of the article.

Correlation analysis revealed a strong positive linear correlation between hydraulic pressure and draft force, with a coefficient of determination $R^2 = 0.97$. Statistical analysis using a paired t-test showed that all performance improvements were significant at $p < 0.05$.

DISCUSSION

The presented results support the study's core hypothesis that integrating hydraulic and automatic control technologies within a closed-loop framework provides an effective solution for protecting equipment from shock loads under difficult soil conditions. The system transforms an electrical signal from the pressure sensor into rapid hydraulic action, while the strong linear correlation between hydraulic pressure and draft force ($R^2 = 0.97$) confirms the reliability of the design and enables accurate calibration of the intervention point. The electro-hydraulic directional control valve, combined with pilot-operated check valves, ensures fast response and smooth energy transfer while minimizing harmful transient effects.

The obtained results are consistent with previous studies emphasizing accurate hydraulic control and power management. However, unlike previous studies that focused on performance and hydraulic circuit analysis [1; 2], the present study addresses transient overload conditions by integrating real-time hydraulic feedback with the mechanical response of the subsoiler. Similarly, while demonstrated the advantages of electro-hydraulic control for traction systems [3], the proposed system specifically targets overload protection, a challenge not addressed in the previous work. In contrast to the diagnostic approaches of A. P. Miller and K. G. Pugin [4; 5] and the low-speed applications reviewed [12; 13], the developed system provides immediate protection under severe and unpredictable field conditions.

Compared with the conventional spring-based protection system, the developed hydraulic system achieved a response time of 1.8 s, representing a 40% improvement over the mechanical system (3 s). Experimental results confirmed the successful implementation of the hydraulic circuit, mathematical model, and field validation, with measurable improvements in response time, field efficiency, and fuel consumption. These findings demonstrate that the proposed system successfully achieved the study objectives.

The study combines theoretical modeling, numerical simulation, and field experimentation to comprehensively validate system performance. Its main strengths include the novel application of closed-loop pressure control for subsoiler protection, quantitative comparison with a conventional protection system, reproducible methodology, and consistent automatic operation during field trials. Nevertheless, several limitations should be considered. The experiments were conducted under a single soil condition using one tractor–implement combination, while the mathematical model neglected fluid inertia and friction losses. In addition, the overload threshold was specific to the tested plow, and long-term durability of the hydraulic components was not evaluated.

The proposed system also provides important operational and economic benefits. Rapid electro-hydraulic response reduces shock loading, metal fatigue, and wear, thereby extending implement service life. Field efficiency increased by 11%, operating speed by 26%, and fuel consumption decreased by 14%. Furthermore, the reduced system weight and automatic protection lower repair downtime and operating costs, demonstrating the practical value of the developed hydraulic protection system for agricultural applications.

CONCLUSION

This study successfully designed, analyzed, and experimentally evaluated an effective hydraulic protection system for a subsoiler plow operating under varying soil resistance. The proposed closed-loop electro-hydraulic system automatically responds when the draft force exceeds the threshold value of 28 kN by lifting the plow and reducing the working depth, thereby protecting the implement from overload. Mathematical analysis confirmed the correct selection of the hydraulic cylinder dimensions, operating pressure, and flow rate, while field experiments verified reliable performance under practical operating conditions. The use of a pressure switch and an electrically actuated directional control valve improved system reliability and minimized dependence on manual control.

The principal contribution of this research is the development and experimental validation of an intelligent hydraulic protection system that integrates real-time pressure feedback with fast electro-hydraulic valve actuation. Unlike conventional protection systems, the proposed design provides both automatic overload protection and rapid depth recovery. Experimental results demonstrated a 40% faster response time, an 11% increase in field efficiency, and a 14% reduction in fuel consumption, confirming the effectiveness of the proposed approach.

The developed system offers a practical solution for protecting subsoiler plows while improving operational safety, reducing operator intervention, and lowering operating costs. Its compatibility with conventional tractor hydraulic systems facilitates practical implementation without major modifications. Future studies should investigate long-term durability, different soil conditions and tillage implements, and the integration of advanced sensors, predictive control algorithms, and wireless monitoring to further improve system performance and adaptability.

REFERENCES

1. Roeber J.B.W., Pitla S.K., Kocher M.F., Luck J.D., Hoy R.M. Tractor Hydraulic Power Data Acquisition System. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2016;(127):1–14. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.05.012>
2. Frosina E., Senatore A., Buono D., Monacelli G., Pintone F. Study of the Performance of the Hydraulic Circuit of an Agricultural Machine with a Lumped Parameter Approach. *International Review on Modelling and Simulations*. 2017;10(1):26–36. <https://doi.org/10.15866/iremos.v10i1.11213>
3. Luo Z., Wang J., Wu J., Zhang S., Chen Z., Xie B. Research on a Hydraulic Cylinder Pressure Control Method for Efficient Traction Operation in Electro-Hydraulic Hitch System of Electric Tractors. *Agriculture*. 2023;13(8):1555. <https://doi.org/10.3390/agriculture13081555>
4. Miller A.P., Pugin K.G. Diagnostics of Hydraulic Cylinders of Road Building Machines using Hydraulic Support. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2023;90(6):551–559. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.17816/0321-4443-568992>
5. Pugin K.G., Shayakbarov I.E. Ensuring Reliability of Hydraulic Systems of Road Construction Machines. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2025;92(2):176–184. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.17816/0321-4443-630654>
6. Bychenin A.P., Volodko O.S., Bazhutov D.N. Hydraulic System for Agricultural Tractors Adapted to Alternative Fluids. In: Bio Web of Conferences: International Scientific-Practical Conference “Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources” (FIES 2020). Kazan: Kazan State Agrarian University; 2020. p. 00056. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20202700056>
7. Pryadkin V.I., Kolyadin P.A. Vibration Loading of Booms Of a self-Propelled Sprayer with Ultra-Low Pressure Tires. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2023;90(6):543–550. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.17816/0321-4443-567796>
8. Sychev D.V., Trushin N.N., Rednikov S.N. Evolution and Improvement of Hydraulic Drives for Vehicles and Stationary Equipment. *Izvestiya Tula State University*. 2023;(9):39–40. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/ctpuvdu>
9. Popov A.Y. Simulation Modeling of the Volumetric Hydraulic Drive. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2018;85(3):45–53. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.17816/0321-4443-66397>
10. Wang L., Wang Y., Dai D., Wang X., Wang S. Review of electro-hydraulic Hitch System Control Method of Automated Tractors. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2021;14(3):1–11. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20211403.6175>
11. Sun X., Song Y., Lu Z., Deng X. Research on a Coordinated Control Method of Tractor Electro-Hydraulic Hitch Tillage Depth and Travel Speed Based on Optimal Overall Efficiency and Economic Performance. *Agriculture*. 2025;15(21):2232. <https://doi.org/10.3390/agriculture15212232>
12. Navone A., Martini M., Chiaberge M. Autonomous Robotic Pruning in Orchards and Vineyards: A Review. *Smart Agricultural Technology*. 2025;(12):101283. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.101283>
13. Werner L., Eyschen P., Costello S., Micarelli P., Hutter M. Calibrated Dynamic Modeling for Force and Payload Estimation in Hydraulic Machinery. *Construction Robotics*. 2025;(9):26. <https://doi.org/10.1007/s41693-025-00169-7>
14. Wrat G., Das J. Energy Saving in Off-Road Vehicles Using Leakage Compensation Technique. *Preprint*. 2025. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2509.20926>
15. Tian X., Guo X., Stump P., Vacca A., Fiorati S., Pintore F. A Pressure Control Method for Increasing the Energy Efficiency of the Hydraulic System Powering Agricultural Implements. *Journal of Sustainable Energy Engineering*. 2024;238(6):176–1088. <https://doi.org/10.1177/09596518241227250>
16. Korchagina M.V., Stepanov V.N., Kireev S.O., Lebedev A.R. Investigation of Parameters Influencing the Establishment of Hydrostatic Mode in the Crosshead-Guide Assembly of High-Pressure Plunger Pump. *Advanced Engineering Research*. 2024;24(4):316–327. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-4-316-327>
17. Zenin A.R., Rybak A.T., Beskopylny A.N., Pelipenko A.Yu., Serdyukova Yu.A. Testing Bench for Reciprocating Hydraulic Cylinders with Energy Recovery: Structure, Simulation, and Calculation.

Advanced Engineering Research. 2024;24(4):347–359. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-4-347-359>

18. Costa G.K., Sepehri N. Understanding Overall Efficiency of Hydrostatic Pumps and Motors. *International Journal of Fluid Power*. 2018;19(2):106–116. <https://doi.org/10.1080/14399776.2018.1476306>
19. Penglong Z., Liu J., Wu W.W. Dynamic Analysis and Model Predictive Control of Excavator's Working Device. *Journal of Physics Conference Series*. 2022;(2195):012039. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2195/1/012039>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Roeber J.B.W., Pitla S.K., Kocher M.F., Luck J.D., Hoy R.M. Tractor Hydraulic Power Data Acquisition System. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2016;(127):1–14. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.05.012>
2. Frosina E., Senatori A., Buono D., Monacelli G., Pintone F. Study of the Performance of the Hydraulic Circuit of an Agricultural Machine with a Lumped Parameter Approach. *International Review on Modelling and Simulations*. 2017;10(1):26–36. <https://doi.org/10.15866/iremos.v10i1.11213>
3. Luo Z., Wang J., Wu J., Zhang S., Chen Z., Xie B. Research on a Hydraulic Cylinder Pressure Control Method for Efficient Traction Operation in Electro-Hydraulic Hitch System of Electric Tractors. *Agriculture*. 2023;13(8):1555. <https://doi.org/10.3390/agriculture13081555>
4. Миллер А.П., Пугин К.Г. Диагностирование гидроцилиндров строительно-дорожных машин с помощью гидравлического подпора. *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 2023;90(6):551–559. <https://doi.org/10.17816/0321-4443-568992>
5. Bychenin A.P., Volodko O.S., Bazhutov D.N. Hydraulic System for Agricultural Tractors Adapted to Alternative Fluids. In: Bio Web of Conferences: International Scientific-Practical Conference “Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources” (FIES 2020). Kazan: Kazan State Agrarian University; 2020. p. 00056. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20202700056>
6. Прядкин В.И., Колядин П.А. Вибронагруженность штанг самоходного опрыскивателя на шинах сверхнизкого давления. *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 2023;90(6):543–550. <https://doi.org/10.17816/0321-4443-567796>
7. Пугин К.Г., Шаякбаров И.Э. Обеспечение надежности гидравлических систем строительно-дорожных машин. *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 2025;92(2):176–184. <https://doi.org/10.17816/0321-4443-630654>
8. Сычев Д.В., Трушин Н.Н., Редников С.Н. тенденции развития и совершенствования гидравлических приводов мобильных и стационарных машин. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2023;(9):39–40. <https://elibrary.ru/ctpuv>
9. Попов А.Ю. Имитационное моделирование объемного гидропривода. *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 2018;85(3):45–53. <https://doi.org/10.17816/0321-4443-66397>
10. Wang L., Wang Y., Dai D., Wang X., Wang S. Review of electro-hydraulic Hitch System Control Method of Automated Tractors. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2021;14(3):1–11. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20211403.6175>
11. Sun X., Song Y., Lu Z., Deng X. Research on a Coordinated Control Method of Tractor Electro-Hydraulic Hitch Tillage Depth and Travel Speed Based on Optimal Overall Efficiency and Economic Performance. *Agriculture*. 2025;15(21):2232. <https://doi.org/10.3390/agriculture15212232>
12. Navone A., Martini M., Chiaberge M. Autonomous Robotic Pruning in Orchards and Vineyards: A Review. *Smart Agricultural Technology*. 2025;(12):101283. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.101283>
13. Werner L., Eyschen P., Costello S., Micarelli P., Hutter M. Calibrated Dynamic Modeling for Force and Payload Estimation in Hydraulic Machinery. *Construction Robotics*. 2025;(9):26. <https://doi.org/10.1007/s41693-025-00169-7>
14. Wrat G., Das J. Energy Saving in Off-Road Vehicles Using Leakage Compensation Technique. *Preprint*. 2025. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2509.20926>

15. Tian X., Guo X., Stump P., Vacca A., Fiorati S., Pintore F. A Pressure Control Method for Increasing the Energy Efficiency of the Hydraulic System Powering Agricultural Implements. *Journal of Sustainable Energy Engineering*. 2024;238(6):176–1088. <https://doi.org/10.1177/09596518241227250>
16. Korchagina M.V., Stepanov V.N., Kireev S.O., Lebedev A.R. Investigation of Parameters Influencing the Establishment of Hydrostatic Mode in the Crosshead-Guide Assembly of High-Pressure Plunger Pump. *Advanced Engineering Research*. 2024;24(4):316–327. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-4-316-327>
17. Zenin A.R., Rybak A.T., Beskopylny A.N., Pelipenko A.Yu., Serdyukova Yu.A. Testing Bench for Reciprocating Hydraulic Cylinders with Energy Recovery: Structure, Simulation, and Calculation. *Advanced Engineering Research*. 2024;24(4):347–359. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-4-347-359>
18. Costa G.K., Sepehri N. Understanding Overall Efficiency of Hydrostatic Pumps and Motors. *International Journal of Fluid Power*. 2018;19(2):106–116. <https://doi.org/10.1080/14399776.2018.1476306>
19. Penglong Z., Liu J., Wu W.W. Dynamic Analysis and Model Predictive Control of Excavator's Working Device. *Journal of Physics Conference Series*. 2022;(2195):012039. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2195/1/012039>

About the authors:

Imad R. Antypas, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Fundamentals of Machine Design, Don State Technical University (1 Gagarin Sq., Rostov-on-Don 344000, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8141-9529>, Researcher ID: O-4789-2018, Scopus ID: 57191988834, SPIN-code: 7371-0223, imad.antypas@mail.ru

The author has read and approved the final manuscript.

Submitted 23.01.2026; revised 13.03.2026; accepted 16.03.2026

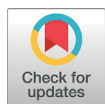
Об авторах:

Антибас Имад Ризакалла, кандидат технических наук, доцент кафедры основы конструирования машин Донского государственного технического университета (344000, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8141-9529>, Researcher ID: O-4789-2018, Scopus ID: 57191988834, SPIN-код: 7371-0223, imad.antypas@mail.ru

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 23.01.2026; поступила после рецензирования 13.03.2026;
принята к публикации 16.03.2026*

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ / INSTRUMENTS AND METHODS OF EXPERIMENTAL PHYSICS


<https://doi.org/10.15507/2658-4123.26363.662-675>

EDN: <https://elibrary.ru/zezgoy>

УДК / UDK 544.7-036.6:542.943

Оригинальная статья / Original article

Повышение диспергируемости многостенных углеродных нанотрубок и их равномерное распределение в полимерной матрице при мягкой кислотной обработке

С. М. Хантимеров¹✉, Р. Р. Гарипов¹, И. А. Емельянов²,
Н. М. Сулейманов¹

¹КФТИ – обособленное структурное подразделение
ФИЦ КазНЦ РАН,

г. Казань, Российская Федерация, <https://ror.org/026c02f25>

²Казанский (Приволжский) федеральный университет,

г. Казань, Российская Федерация, <https://ror.org/05256ym39>

✉ khantim@mail.ru

Аннотация

Введение. Полимерные композиты, модифицированные углеродными нанотрубками, позволяют создавать материалы с улучшенными механическими, электрическими и теплопроводящими свойствами. Однако широкое применение таких материалов ограничено неравномерностью распределения нанотрубок в полимерной матрице и их склонностью к агрегации. Для решения данной проблемы может применяться химическая функционализация углеродных нанотрубок, в частности, кислотная обработка. Оценка ее влияния на распределение нанотрубок в полимерной матрице позволит при масштабировании технологии снизить затраты на производство мастер-батчей и изделий на основе полимерных композиционных материалов.

Цель исследования. Разработка щадящего режима функционализации многостенных углеродных нанотрубок, обеспечивающего получение полимерных композиционных материалов с равномерным распределением наполнителя.

Материалы и методы. Объектом выступили многостенные углеродные нанотрубки марки LUCAN BT 1001M в исходном и обработанном (в смеси азотной и серной кислот) виде. Удельная площадь поверхности образцов определялась адсорбционными методами и анализировалась методом Брунауэра – Эммета – Теллера. Исследование распределения исходных и обработанных многостенных углеродных нанотрубок осуществлялось методом оптической микроскопии.

Результаты исследования. Удельная поверхность многостенных углеродных нанотрубок увеличивается после их функционализации. Их обработка в щадящем режиме позволяет получать устойчивые водные дисперсии и вводить их в полимерные среды, достигая равномерного распределения наполнителя.

© Хантимеров С.М., Гарипов Р.Р., Емельянов И.А., Сулейманов Н.М., 2026



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

Закключение. Для практического применения углеродных нанотрубок необходима их предварительная обработка для функционализации. Щадящая обработка показала свою эффективность при введении и распределении нанотрубок в полимерной матрице для получения композиционных материалов.

Ключевые слова: многостенные углеродные нанотрубки (МУНТ), функционализация, полимеры, композиционные материалы, жидкофазное окисление, полимерная матрица, полиметилметакрилат

Финансирование: работа выполнена за счет гранта Академии наук Республики Татарстан № 88/2024-ПД, предоставленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках Государственной программы Республики Татарстан «Научно-технологическое развитие Республики Татарстан».

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Хантимеров С.М., Гарипов Р.Р., Емельянов И.А., Сулейманов Н.М. Повышение диспергируемости многостенных углеродных нанотрубок и их равномерное распределение в полимерной матрице при мягкой кислотной обработке. *Инженерные технологии и системы*. 2026;36(3):662–675. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.26363.662-675>

Increasing the Dispersibility of Multi-walled Carbon Nanotubes and Their Uniform Distribution in the Polymer Matrix Using Soft Acid Treatment

S. M. Khantimerov^{a✉}, R. R. Garipov^a, I. A. Emelyanov^b,
N. M. Suleimanov^a

^aZPTI – Subdivision of FIC KazanSC of RAS,
Kazan, Russian Federation, <https://ror.org/026c02f25>

^bKazan (Volga region) Federal Univtrstiy,
Kazan, Russian Federation, <https://ror.org/05256ym39>

✉ khantim@mail.ru

Abstract

Introduction. Modern polymer composites modified with carbon nanotubes open up new possibilities for creating materials with improved mechanical, electrical and thermal conductivity properties. The key problem limiting wide application of these materials is the uneven distribution of nanotubes in the polymer matrix and their tendency to aggregate. To solve this problem, there can be used chemical functionalization of carbon nanotubes, in particular acid treatment. When scaling up the technology, evaluating the effect of this treatment on the distribution of carbon nanotubes in a polymer matrix will allow reducing the cost of manufacturing masterbatches and products based on polymer composite materials.

Aim of the Study. The study is aimed at developing a gentle carbon nanotubes functionalization regime that ensures the production of polymer composite materials with a uniform filler distribution.

Materials and Methods. The object of the study was multi-walled carbon nanotubes LUCAN BT 1001M in their original and treated (with a mixture of nitric and sulfuric acids) forms. The specific surface area of the samples was determined by the adsorption

methods and analyzed with the use of the Brunauer–Emmett–Teller method. The distribution of the original and treated multi-walled carbon nanotubes was investigated by the optical microscopy method.

Results. It has been found that the specific surface area of multi-walled carbon nanotubes increases after functionalization. It has shown that the treatment of carbon nanotubes in a gentle mode makes it possible to obtain stable aqueous dispersions and distribute them uniformly in a polymer matrix.

Conclusion. The results obtained indicate the need for a functionalization procedure of carbon nanotubes for their practical application and indicate the effectiveness of a gentle nanotube treatment regime for obtaining composite materials with uniformly distributed filler.

Keywords: carbon nanotubes, functionalization, polymers, composite materials, liquid-phase oxidation, polymer matrix, polymethylmethacrylate

Finding: The work was supported by a grant from the Academy of Sciences № 88/2024-PD of the Republic of Tatarstan, provided to young candidates of science (postdoctoral students) for the purpose of defending a doctoral dissertation, carrying out research work, and also performing work functions in scientific and educational organizations of the Republic of Tatarstan within the framework of the State Program of the Republic of Tatarstan “Scientific and Technological Development of the Republic of Tatarstan”.

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

For citation: Khantimerov S. M., Garipov R.R., Emelyanov I.A., Suleimanov N.M. Increasing the Dispersibility of Multi-walled Carbon Nanotubes and Their Uniform Distribution in the Polymer Matrix Using Soft Acid Treatment. *Engineering Technologies and Systems*. 2026;36(3):662–675. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.26363.662-675>

ВВЕДЕНИЕ

Углеродные нанотрубки (УНТ) демонстрируют исключительный потенциал для создания нового поколения композитных материалов с улучшенными эксплуатационными характеристиками [1; 2]. Благодаря своим уникальным свойствам УНТ имеют перспективы применения в области медицины [3; 4], материаловедения [5], энергетики [6], экологии [7], машино- и приборостроения [8]. Большой интерес представляет их применение в строительной индустрии [9], где они могут значительно повысить прочность, долговечность и функциональные свойства строительных материалов. В полимерных композитах УНТ выступают в качестве многофункционального наполнителя, способного одновременно улучшать механическую прочность, теплопроводность и электропроводность материала. Полимерные электропроводящие композиционные материалы в зависимости от концентрации нанотрубок в полимерной матрице позволяют создавать антистатические, проводящие и экранирующие покрытия, а также конструкции, востребованные в авиационной и автомобильной промышленности, химическом производстве, приборостроении и др. [10–12].

Практическое применение композиционных материалов на основе полимеров и УНТ затрудняется тем, что углеродные нанотрубки в исходном виде представляют собой крупные агломераты в виде жгутов и клубков, состоящих из большого числа скрученных нанотрубок (за исключением специальных методик синтеза, которые позволяют синтезировать индивидуальные и выровненные УНТ [13]).

Разрушение таких агломератов может быть достигнуто путем ультразвуковой обработки, однако со временем нанотрубки могут вновь агломерировать из-за высокой поверхностной энергии [14]. Одним из широко используемых подходов, применяемых для решения проблемы агломерирования УНТ, является химическая модификация поверхности нанотрубок с использованием кислот или щелочей для формирования кислородсодержащих функциональных групп на их поверхности [15–17]. Благодаря такой обработке УНТ могут более равномерно распределяться в полимерной матрице за счет увеличения энергии их взаимодействия и снижения энергии взаимодействия УНТ друг с другом. Кроме того, в исходном виде углеродные нанотрубки содержат примеси в виде разупорядоченного углерода и остаточных частиц металлического катализатора, которые могут быть удалены в процессе химической обработки. Эта процедура обычно представляет собой длительный процесс кипячения УНТ в реакционной смеси [18–19]. Однако химическая обработка в сильных окислителях в течение длительного времени может приводить к изменению (ухудшению) электрофизических и физико-механических свойств углеродных нанотрубок из-за появления структурных дефектов [20–21].

Поэтому целью исследования является разработка методики щадящей термохимической обработки многостенных углеродных нанотрубок LUCAN BT 1001M компании LG Chem, которая позволит получать функционализированные углеродные нанотрубки и полимерные композиционные материалы на основе полиметилметакрилата с равномерным распределением наполнителя.

Для достижения поставленной цели необходимо оценить: существующие методики химической обработки углеродных нанотрубок; эффективность методики обработки таких нанотрубок при снижении количества времени и температуры обработки; возможность применения разработанной методики для получения полимерных композиционных материалов с равномерно распределенным наполнителем на примере полиметилметакрилата.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В основном для очистки и функционализации УНТ применяются смеси на основе азотной [22; 23] и серной кислот или их смеси [24–26]. Кроме этого встречаются методики, основанные на применении щелочей [27].

Исследователи из Ирана предложили осуществлять очистку и функционализацию одностенных углеродных нанотрубок путем обработки в NaOH в течение 6 часов и последующей обработке в HNO_3 в течение 1 часа при температуре 100 °C [22]. Полученные результаты демонстрируют эффективность такой обработки с точки зрения удаления примесей. Однако не была рассмотрена дисперсность углеродных нанотрубок и возможность их распределения в различных средах.

В свою очередь, N. Sezer и M. Koç изучили эффективность обработки многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ) в различных составах на основе азотной кислоты (10 М HNO_3 , 15 М HNO_3 , 10 М $\text{HNO}_3/\text{H}_2\text{SO}_4$, 15 М $\text{HNO}_3/\text{H}_2\text{SO}_4$) [23]. Соотношение МУНТ к окислителю составляло 1 мг на 1 мл раствора. Обработка проводилась в течение 5 часов при температуре 120 °C. Проверка устойчивости водных дисперсий, обработанных МУНТ, показала, что исходные образцы

и образцы, обработанные в 10 М HNO_3 , выпали в осадок, а образцы, обработанные в 15 М HNO_3 и 10 М $\text{HNO}_3/\text{H}_2\text{SO}_4$, сохранили свою устойчивость даже после 3 месяцев.

Отечественные ученые для обработки УНТ типа Таунит также использовали азотную кислоту и смесь серной и азотной кислот [24]. Однако длительность кипячения составила лишь 10 минут, и соотношение УНТ к кислотам отличалось. Так, в случае азотной кислоты для обработки 20–100 мг УНТ было использовано 10 мл кислоты, а в случае со смесью кислот на 20 мг УНТ – 10 мл окислителя. Кроме того, было исследовано влияние термического окисления МУНТ на воздухе при температуре 230 °С. Степень функционализации оценивалась методом дифференциально-термического анализа. Был сделан вывод о том, что обработка УНТ в азотной кислоте позволяет формировать на поверхности нанотрубок большее количество функциональных групп по сравнению с двумя другими подходами. Также было установлено, что такая обработка позволяет повысить термическую устойчивость нанотрубок на 100 °С. Продемонстрирована возможность применения обработанных УНТ для создания мембранно-электродных блоков для электрохимических преобразователей энергии, однако не показана их диспергируемость [25; 26].

Наряду с преимуществами (одновременная очистка и функционализация углеродных нанотрубок) химическая функционализация имеет и недостатки, связанные с появлением дефектов в углеродных нанотрубках и ухудшением их свойств. Так, например, учеными из физико-технического института им. А. Ф. Иоффе была исследована электропроводность образцов углеродных нанотрубок, допированных азотом после кипячения в 30 % (масс.) HCl и функционализации путем кипячения в 68 % (масс.) HNO_3 в течение 0,5–12 ч [27]. Они показали, что с ростом времени обработки увеличивается сопротивление УНТ. Также было исследовано влияние смеси концентрированных азотной и серной кислот на растворение аморфного углерода и МУНТ [28]. Варьировались такие параметры, как время обработки, соотношение кислот, объем используемой смеси кислот. Масса растворенного углерода увеличивалась с увеличением времени, температуры и объема используемой смеси кислот.

Таким образом, подход, основанный на сокращении времени и температуры обработки углеродных нанотрубок, вызывает интерес с точки зрения эффективности функционализации и диспергирования УНТ, а также снижения воздействия на их структуру и электронные свойства.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования

В качестве объекта исследования были взяты исходные (необработанные) и обработанные в смеси азотной и серной кислот многостенные углеродные нанотрубки LUCAN BT 1001M компании LG Chem со следующими техническими характеристиками: насыпная плотность – 0,110 г/см³, средний диаметр – 10 нм, средняя длина – 16 мкм, площадь поверхности – 250 м²/г, содержание углеродных нанотрубок 96 мас. %.

Материалы, оборудование и процедура исследования

Обработка МУНТ проводилась с использованием смеси химически чистых 65 мас. % HNO_3 производства Merk и 93,6 мас. % H_2SO_4 производства Сигма Тек в объемном соотношении $\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{SO}_4 = 1:3$. Обработка МУНТ осуществлялась в течение 1 часа с использованием ультразвуковой ванны ПСБ-9560-05 объемом 9,5 л, мощностью озвучивания 300 Вт и частотой 60 кГц. Объем дисперсии УНТ/смесь кислот составлял 400 мл. В процессе обработки смесь МУНТ/окислитель нагревалась до 43 °С (начальная температура 20 °С). Ультразвуковое воздействие позволило разбить агломераты, что способствовало улучшению процедуры функционализации.

После окончания процедуры обработки углеродные нанотрубки отфильтровывались методом вакуумной фильтрации и промывались дистиллированной водой. После достижения нейтрального pH МУНТ переносились в выпарительную чашу, и с помощью электрической плитки осуществлялось выпаривание жидкости при температуре 100 °С. После выпаривания МУНТ дополнительно сушились в вакуумной печи 2 часа при температуре 100 °С.

Удельная поверхность образцов многостенных углеродных нанотрубок определялась по методу Брунауэра – Эммета – Теллера на анализаторе газовой сорбции QUICK 200 при температуре жидкого азота.

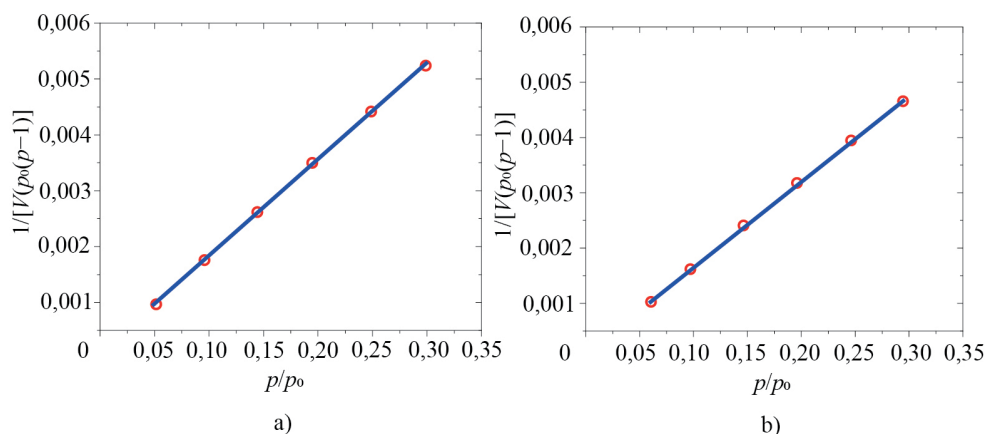
Для качественной оценки эффективности обработки углеродных нанотрубок были изготовлены дисперсии нанотрубок в воде, и проводился визуальный тест с фиксацией времени, которое прошло с момента изготовления образцов. Для получения дисперсий 10 мг нанотрубок диспергировались в 100 мл дистиллированной воды в течение получаса с использованием ультразвукового генератора И10-0,63. Устойчивость водных дисперсий оценивалась сразу после приготовления, через час и полгода.

Получение образцов композиционного материала на основе исходных и обработанных УНТ осуществлялось растворением полиметилметакрилата (ПММА) производства Acros Organics в химически чистом хлорбензоле производства Scharlab в концентрации 0,5 мас. % полимера и диспергированием в данном растворе УНТ в концентрации 0,1 мас. % к массе полимера. Диспергирование УНТ осуществлялось при помощи ультразвукового генератора И10-0,63 на частоте 22 кГц с мощностью озвучивания 300 Вт. Объем дисперсии ($\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}/\text{ПММА}/\text{УНТ}$) – 100 мл. Для исследования распределения МУНТ в полимерной матрице на стеклянной подложке методом спин-коутинга формировались тонкие пленки композиционного материала при скорости вращения подложки с образцом порядка 3 000 мин⁻¹.

Исследование распределения нанотрубок в полимерной матрице проводилось при помощи оптического микроскопа, который входит в состав лабораторного комплекса Solver BIO (ИТ-МДТ, Зеленоград, Россия).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для определения влияния обработки УНТ на их удельную поверхность методом Брунауэра – Эммета – Теллера исследованы исходные и обработанные МУНТ. На рисунке 1 представлены изотермы адсорбции образцов. Экспериментальные точки аппроксимированы прямой линией с коэффициентом корреляции > 0,999.



Р и с. 1. Изотермы адсорбции для образцов многостенных углеродных нанотрубок: а) исходных; б) обработанных

F i g. 1. Isotherm of adsorption of multi-walled carbon nanotubes: a) original; b) treated

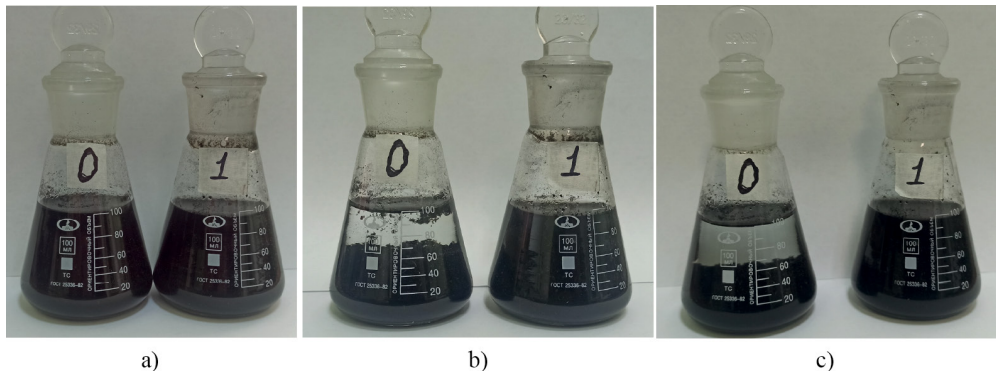
Источни́к: графики для рисунка 1 составлены авторами статьи в программе OriginPro, Version 2022.

Source: The graphs for figure 1 were compiled by the authors of the article in the program OriginPro, Version 2022.

Анализ экспериментальных результатов методом Брунауэра – Эммета – Теллера позволил установить, что удельная площадь поверхности для исходных МУНТ составила 250,3 и 277,8 м²/г для обработанных. После обработки углеродных нанотрубок их удельная поверхность увеличивается, что может быть связано с удалением более плотных примесей из образца и с «открытием» нанотрубок за счет окисления полуфуллереной головки. При этом после обработки нанотрубок в течение 1 часа наблюдалось увеличение удельной площади поверхности образца на ~11 %.

Результаты оценки устойчивости водных дисперсий изображены на рисунке 2. Благодаря ультразвуковому диспергированию исходные и обработанные МУНТ образуют однородные водные дисперсии, но со временем дисперсия на основе необработанных углеродных нанотрубок начинает расслаиваться. Из рисунка 2 б видно, что большая часть исходных углеродных нанотрубок уже образовала осадок. В случае дисперсии на основе функционализированных МУНТ дисперсия сохраняла свою устойчивость даже через 6 месяцев после изготовления.

Для исследования распределения МУНТ в полимерных средах были изготовлены образцы на основе ПММА и нанотрубок с концентрацией 0,1 мас. %. Образцы представляли собой стеклянную подложку с композитной пленкой на поверхности с толщиной 50 нм. На рисунке 3 представлены микрофотографии образцов композиционного материала на основе исходных и обработанных МУНТ.



a)

b)

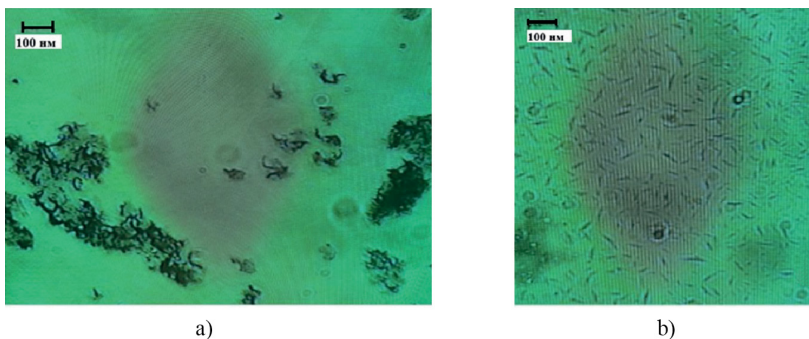
c)

Р и с. 2. Фотографии водных дисперсий образцов МУНТ:
0 – исходные; 1 – обработанные в течение 1 часа: а) сразу после диспергирования;
б) через 1 час; в) через 6 месяцев

Fig. 2. Photographs of aqueous dispersions samples of MWCNT: 0 – original; 1 – treated for 1-hour:
a) immediately after dispersion; b) 1 hour after dispersion; c) 6 months after dispersion

Источник: фотографии для рисунка 2 были сделаны Р. Р. Гариповым. Образцы хранились в шкафу для хранения реактивов, фотосъемка проводилась без перемещения образцов 17.10.2024 и 17.04.2025 г. соответственно.

Source: The photos for figure 2 were taken by the author R. R. Garipov. The samples were stored in a reagent cabinet, the photos were taken without moving the samples October 17, 2024, and April 17, 2025, respectively.



a)

b)

Р и с. 3. Микрофотографии образцов композиционного материала на основе МУНТ:
а) исходных; б) функционализированных

Fig. 3. Micrographs of composite material samples based:
a) original; b) treated multi-walled carbon nanotubes

Источник: фотографии для рисунка 3 были сделаны Р. Р. Гариповым с монитора оптического микроскопа, который входит в состав лабораторного комплекса Solver BIO (НТ-МДТ, Зеленоград, Россия) в КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН 21.04.2025 г.

Source: The photos for figure 3 were taken by the author R. R. Garipov from the monitor of an optical microscope that is part of the Solver BIO laboratory complex (NT-MDT, Zelenograd, Russia) at the Kazan Federal University on April 21, 2025.

Углеродные нанотрубки без обработки остаются в агломерированном состоянии даже после диспергирования ультразвуком (рис. 3 а). В то же время обработанные при щадящем режиме МУНТ не образуют агломераты и равномерно

распределяются в полимерной матрице (рис. 3 б). Со временем, как и в случае с водными дисперсиями (рис. 2), смесь C_6H_5Cl /ПММА/УНТ на основе необработанных МУНТ расслоилась, а на основе обработанных – сохранилась однородной.

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты показывают, что, в отличие от методик, предполагающих кипячение в кислых средах [23; 26; 27], химическая обработка многостенных углеродных нанотрубок без нагрева до кипения в течение непродолжительного времени может быть достаточно эффективной при удалении примесей и способствовать равномерному распределению МУНТ в полимерной матрице. Так, например, если сравнивать полученные результаты (рис. 2) с результатами исследований N. Sezer и M. Koç, которые обрабатывали МУНТ в течение 5 часов при температуре 120 °С, а потом оценивали устойчивость водных дисперсий [23], то можно отметить, что предлагаемая методика позволила достигнуть аналогичных результатов с меньшими энергетическими и временными затратами. Кроме того, обработанные по предложенной методике УНТ могут применяться для получения полимерных композитов на основе полиметилметакрилата с равномерным распределением наполнителя (рис. 3). Также, это актуально при работе с реактопластичными полимерами, однако существует ограничение по применению методики к термопластам, особенно устойчивым к различным растворителям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Равномерное распределение многостенных углеродных нанотрубок в полимерной матрице может быть достигнуто при использовании МУНТ, подвергнутых функционализации в щадящем режиме при малом времени их обработки и без кипячения в смеси кислот. При этом водные дисперсии на основе обработанных углеродных нанотрубок сохраняют устойчивость.

Разработанная методика позволяет получать полимерные композиты с однородным распределением наполнителя, что важно при разработке и создании материалов с улучшенными физико-механическими характеристиками.

Дальнейший план исследований предполагает проведение расширенного анализа механических и электрофизических свойств композитов от УНТ, полученных по разработанной методике не только на основе ПММА, но и других полимеров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ali Z., Yaqoob S., Yu J., D'Amore A. Critical Review on the Characterization, Preparation, and Enhanced Mechanical, Thermal, and Electrical Properties of Carbon Nanotubes and Their Hybrid Filler Polymer Composites for Various Applications. *Composites Part C: Open Access*. 2024;(13):100434. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2024.100434>
2. Yadav R.S., Kuřitka I. Recent Developments on Nanocomposites Based on Spinel Ferrite and Carbon Nanotubes for Applications in Electromagnetic Interference Shielding and Microwave Absorption. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*. 2024;49(3):371–407. <https://doi.org/10.1080/10408436.2023.2214577>

3. Ijaz H., Mahmood A., Abdel-Daim M.M., Sarfraz R.M., Zaman M., Zafar N., et al. Review on Carbon Nanotubes (CNTs) and their Chemical and Physical Characteristics, with Particular Emphasis on Potential Applications in Biomedicine. *Inorganic Chemistry Communications*. 2023;(155):111020. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.111020>
4. Thakur C.K., Karthikeyan C., Abou-Dahech M.S., Altabakha M.M.A.M., Al Shahwan M.J.S., Ashby C.R., et al. Microwave-Assisted Functionalization of Multi-Walled Carbon Nanotubes for Biosensor and Drug Delivery Applications. *Pharmaceutics*. 2023;15(2):335. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15020335>
5. Qu S., Yang D., Gao N., Xu P., Jiang X., Cheng K., et al. Polymer Binder-Free Aqueous Spinning of Biomimetic CNT based Hierarchical Hollow Fiber for Structural and Energy Storage Application. *Chemical Engineering Journal*. 2024;(486):150113. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.150113>
6. Kanagamani K., Geethamani P., Muthukrishnan P. Applications of Carbon Nanotubes in Energy Storage Devices. *Indian Journal of Chemical Technology*. 2023;(30):423–429. <https://doi.org/10.56042/ijct.v30i4.69419>
7. Pyrzynska K. Recent Applications of Carbon Nanotubes for Separation and Enrichment of Lead Ions. *Separations*. 2023;10(3):152. <https://doi.org/10.3390/separations10030152>
8. Teng Y., Li J., Yao J., Kang L., Li Q. Filled Carbon-Nanotube Heterostructures: from Synthesis to Application. *Microstructures*. 2023;(3):2023019. <https://doi.org/10.20517/microstructures.2023.07>
9. Yang S. Properties, Applications, and Prospects of Carbon Nanotubes in the Construction Industry. *Architecture, Structures and Construction*. 2023(3):289–298. <https://doi.org/10.1007/s44150-023-00090-z>
10. Cai X., Wang S., Peng L.-M. Recent Progress of Photodetector Based on Carbon Nanotube Film and Application in Optoelectronic Integration. *Nano Research Energy*. 2023;2(2):e9120058. <https://doi.org/10.26599/NRE.2023.9120058>
11. Łukawski D., Hochmańska-Kaniewska P., Janiszewska-Latterini D., Lekawa-Raus A. Functional Materials Based on Wood, Carbon Nanotubes, and Graphene: Manufacturing, Applications, and Green Perspectives. *Wood Science and Technology*. 2023;(57):989–1037. <https://doi.org/10.1007/s00226-023-01484-4>
12. Alosime E.M. A Review on Surface Functionalization of Carbon Nanotubes: Methods and Applications. *Discover Nano*. 2023;(18):12. <https://doi.org/10.1186/s11671-023-03789-6>
13. Iakoubovskii K. Techniques of Aligning Carbon Nanotubes. *Central European Journal of Physics*. 2009;7(4):645–653. <https://doi.org/10.2478/s11534-009-0072-2>
14. Li H., Wang G., Wu Y., Jiang N., Niu K. Functionalization of Carbon Nanotubes in Polystyrene and Properties of their Composites: A Review. *Polymers*. 2024;16(6):770. <https://doi.org/10.3390/polym16060770>
15. Datsyuk V., Kalyva M., Papagelis K., Parthenios J., Tasis D., Siokou A., et al. Chemical Oxidation of MultiWalled Carbon Nanotubes. *Carbon*. 2008;(46):833–840. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2008.02.012>
16. Tugelbayev A., Kim J.-H., Lee J.U., Chung C.-W. The Effect of Acid Treated Multi-Walled Carbon Nanotubes on the Properties of Cement Paste Prepared by Ultrasonication with Polycarboxylate Ester. *Journal of Building Engineering*. 2023;(64):105638. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105638>
17. Pavia M., Emo M., Estellé P., Mohamed A.R., Vigolo B. Controlled Structural Damaging of Multiwalled Carbon Nanotubes and Graphene Nanoplatelets by Oxidation for Stable Nanofluids with Enhanced Thermal Conductivity. *Journal of Molecular Liquids*. 2023;(390):123194. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.123194>
18. Hasnol A.N.Y., Thivagar R., Naresh S., Shuit S.H., Balakrishnan K. Functionalization of Multiwall Carbon Nanotubes (MWCNTS) using Phosphoric Acid for Immobilization of Cellulase. *NanoWorld Journal*. 2023;9(1):15–22. <https://doi.org/10.17756/nwj.2023-112>
19. Singh S., Oum W., Kim S.S., Kim H.W. Functionalized Multiwalled Carbon Nanotubes for Highly Stable Room Temperature and Humidity-Tolerant Triethylamine Sensing. *ACS Sensors*. 2023;8(12):4664–4675. <https://doi.org/10.1021/acssensors.3c01721>
20. O'Rear E.A., Onthong S., Pongprayoon T. Mechanical Strength and Conductivity of Cementitious Composites with Multiwalled Carbon Nanotubes: To Functionalize or Not? *Nanomaterials*. 2024;14(1):80. <https://doi.org/10.3390/nano14010080>
21. Garipov R.R., Khantimerov S.M., Lvov S.G., Shustov V.A., Kurbatova N.V., Suleimanov N.M. Effect of Thermochemical Treatment on the State of SWNT and on the Electrical Conductivity of

- Epoxy-SWNT Composites. *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*. 2021;29(4):251–257. <https://doi.org/10.1080/1536383X.2020.1833191>
22. Aghaei A., Shaterian M., Hosseini-Monfared H., Farokhi A. Single-Walled Carbon Nanotubes: Synthesis and Quantitative Purification Evaluation by Acid/Base Treatment for High Carbon Impurity Elimination. *Chemical Papers*. 2023;(77):249–258. <https://doi.org/10.1007/s11696-022-02478-5>
23. Sezer N., Koç M. Oxidative Acid Treatment of Carbon Nanotubes. *Surfaces and Interfaces*. 2019;(14):1–8. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2018.11.001>
24. Глебова Н.В., Нечитайлов А.А. Функционализация поверхности многостенных углеродных нанотрубок. *Письма в журнал технической физики*. 2010;36(19):8–15. URL: <https://journals.ioffe.ru/articles/14152> (дата обращения: 26.11.2025).
25. Забродский А.Г., Глебова Н.В., Нечитайлов А.А., Терукова Е.Е., Теруков Е.И., Томасов А.А. и др. Мембранно-электродные блоки с высокой удельной мощностью на основе функционализированных многостенных углеродных нанотрубок. *Письма в журнал технической физики*. 2010;36(23):98–105. URL: <https://journals.ioffe.ru/articles/14220> (дата обращения: 26.11.2025).
26. Нечитайлов А.А., Глебова Н.В. О механизме влияния кислородно-модифицированных углеродных нанотрубок на кинетику электровосстановления кислорода на платине. *Электрохимия*. 2014;50(8):835. <https://doi.org/10.7868/S042485701408012X>
27. Суслова Е.В., Архипова Е.А., Калашник А.В., Иванов А.С., Савилов С.В., Ся Х. и др. Влияние функционализации допированных азотом углеродных нанотрубок на электропроводность. *Журнал физической химии*. 2019;93(10):1551–1555. <https://doi.org/10.1134/S0044453719100303>
28. Алексашина Е.В., Мищенко С.В., Соцкая Н.В., Ткачев А.Г., Вигдорович В.И., Долгих О.В. Кислотная активация углеродных нанотрубок. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2009;11(2):101–105. <https://elibrary.ru/kxfppb>

REFERENCES

1. Ali Z., Yaqoob S., Yu J., D'Amore A. Critical Review on the Characterization, Preparation, and Enhanced Mechanical, Thermal, and Electrical Properties of Carbon Nanotubes and Their Hybrid Filler Polymer Composites for Various Applications. *Composites Part C: Open Access*. 2024;(13):100434. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2024.100434>
2. Yadav R.S., Kuřitka I. Recent Developments on Nanocomposites Based on Spinel Ferrite and Carbon Nanotubes for Applications in Electromagnetic Interference Shielding and Microwave Absorption. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*. 2024;49(3):371–407. <https://doi.org/10.1080/10408436.2023.2214577>
3. Ijaz H., Mahmood A., Abdel-Daim M.M., Sarfraz R.M., Zaman M., Zafar N., et al. Review on Carbon Nanotubes (CNTs) and their Chemical and Physical Characteristics, with Particular Emphasis on Potential Applications in Biomedicine. *Inorganic Chemistry Communications*. 2023;(155):111020. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.111020>
4. Thakur C.K., Karthikeyan C., Abou-Dahech M.S., Altabakha M.M.A.M., Al Shahwan M.J.S., Ashby C.R., et al. Microwave-Assisted Functionalization of Multi-Walled Carbon Nanotubes for Biosensor and Drug Delivery Applications. *Pharmaceutics*. 2023;15(2):335. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15020335>
5. Qu S., Yang D., Gao N., Xu P., Jiang X., Cheng K., et al. Polymer Binder-Free Aqueous Spinning of Biomimetic CNT based Hierarchical Hollow Fiber for Structural and Energy Storage Application. *Chemical Engineering Journal*. 2024;(486):150113. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.150113>
6. Kanagamani K., Geethamani P., Muthukrishnan P. Applications of Carbon Nanotubes in Energy Storage Devices. *Indian Journal of Chemical Technology*. 2023;(30):423–429. <https://doi.org/10.56042/ijct.v30i4.69419>
7. Pyrzynska K. Recent Applications of Carbon Nanotubes for Separation and Enrichment of Lead Ions. *Separations*. 2023;10(3):152. <https://doi.org/10.3390/separations10030152>
8. Teng Y., Li J., Yao J., Kang L., Li Q. Filled Carbon-Nanotube Heterostructures: from Synthesis to Application. *Microstructures*. 2023;(3):2023019. <https://doi.org/10.20517/microstructures.2023.07>
9. Yang S. Properties, Applications, and Prospects of Carbon Nanotubes in the Construction Industry. *Architecture, Structures and Construction*. 2023(3):289–298. <https://doi.org/10.1007/s44150-023-00090-z>

10. Cai X., Wang S., Peng L.-M. Recent Progress of Photodetector based on Carbon Nanotube Film and Application in Optoelectronic Integration. *Nano Research Energy*. 2023;2(2):e9120058. <https://doi.org/10.26599/NRE.2023.9120058>
11. Łukawski D., Hochmańska-Kaniewska P., Janiszewska-Latterini D., Lekawa-Raus A. Functional Materials Based on Wood, Carbon Nanotubes, and Graphene: Manufacturing, Applications, and Green Perspectives. *Wood Science and Technology*. 2023;(57):989–1037. <https://doi.org/10.1007/s00226-023-01484-4>
12. Alosime E.M. A Review on Surface Functionalization of Carbon Nanotubes: Methods and Applications. *Discover Nano*. 2023;(18):12. <https://doi.org/10.1186/s11671-023-03789-6>
13. Iakoubovskii K. Techniques of Aligning Carbon Nanotubes. *Central European Journal of Physics*. 2009;7(4):645–653. <https://doi.org/10.2478/s11534-009-0072-2>
14. Li H., Wang G., Wu Y., Jiang N., Niu K. Functionalization of Carbon Nanotubes in Polystyrene and Properties of their Composites: A Review. *Polymers*. 2024;16(6):770. <https://doi.org/10.3390/polym16060770>
15. Datsyuk V., Kalyva M., Papagelis K., Parthenios J., Tasis D., Siokou A., et al. Chemical Oxidation of MultiWalled Carbon Nanotubes. *Carbon*. 2008;(46):833–840. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2008.02.012>
16. Tugelbayev A., Kim J.-H., Lee J.U., Chung C.-W. The Effect of Acid Treated Multi-Walled Carbon Nanotubes on the Properties of Cement Paste Prepared by Ultrasonication with Polycarboxylate Ester. *Journal of Building Engineering*. 2023;(64):105638. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105638>
17. Pavia M., Emo M., Estellé P., Mohamed A.R., Vigolo B. Controlled Structural Damaging of Multiwalled Carbon Nanotubes and Graphene Nanoplatelets by Oxidation for Stable Nanofluids with Enhanced Thermal Conductivity. *Journal of Molecular Liquids*. 2023;(390):123194. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.123194>
18. Hasnol A.N.Y., Thivagar R., Naresh S., Shuit S.H., Balakrishnan K. Functionalization of Multiwall Carbon Nanotubes (MWCNTS) using Phosphoric Acid for Immobilization of Cellulase. *NanoWorld Journal*. 2023;9(1):15–22. <https://doi.org/10.17756/nwj.2023-112>
19. Singh S., Oum W., Kim S.S., Kim H.W. Functionalized Multiwalled Carbon Nanotubes for Highly Stable Room Temperature and Humidity-Tolerant Triethylamine Sensing. *ACS Sensors*. 2023;8(12):4664–4675. <https://doi.org/10.1021/acssensors.3c01721>
20. O'Rear E.A., Onthong S., Pongprayoon T. Mechanical Strength and Conductivity of Cementitious Composites with Multiwalled Carbon Nanotubes: To Functionalize or Not? *Nanomaterials*. 2024;14(1):80. <https://doi.org/10.3390/nano14010080>
21. Garipov R.R., Khantimerov S.M., L'vov S.G., Shustov V.A., Kurbatova N.V., Suleimanov N.M. Effect of Thermochemical Treatment on the State of SWNT and on the Electrical Conductivity of Epoxy-SWNT Composites. *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*. 2021;29(4):251–257. <https://doi.org/10.1080/1536383X.2020.1833191>
22. Aghaei A., Shaterian M., Hosseini-Monfared H., Farokhi A. Single-Walled Carbon Nanotubes: Synthesis and Quantitative Purification Evaluation by Acid/Base Treatment for High Carbon Impurity Elimination. *Chemical Papers*. 2023;(77):249–258. <https://doi.org/10.1007/s11696-022-02478-5>
23. Sezer N., Koç M. Oxidative Acid Treatment of Carbon Nanotubes. *Surfaces and Interfaces*. 2019;(14):1–8. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2018.11.001>
24. Glebova N.V., Nechitailov A.A. [Surface Functionalization of Multi-Walled Carbon Nanotubes]. *Technical Physics Letters*. 2010;36(19):8–15. (In Russ.) Available at: <https://journals.ioffe.ru/articles/14152> (accessed 26.11.2025).
25. Zabrodski A.G., Glebova N.V., Nechitailov A.A., Terukova E.E., Terukov E.I., Tomasov A.A., et al. [Membrane-Electrode Assemblies with High Specific Power Based on Functionalized Multi-Walled Carbon Nanotubes]. *Technical Physics Letters*. 2010;36(23):98–105. (In Russ.) Available at: <https://journals.ioffe.ru/articles/14220> (accessed 26.11.2025).
26. Nechitailov A.A., Glebova N.V. [Mechanism of the Effect of Oxygen-Modified Carbon Nanotubes on the Kinetics of Oxygen Electroreduction on Platinum]. *Elektrokhimiya*. 2014;50(8):835. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S042485701408012X>
27. Suslova E.V., Arkhipova E.A., Kalashnik A.V., Ivanov A.S., Savilov S.V., Xia H., et al. [Effect of the Functionalization of Nitrogen-Doped Carbon Nanotubes on Electrical Conductivity]. *Zhurnal Fizicheskoi Khimii*. 2019;93(10):1551–1555. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S0044453719100303>

28. Aleksashina E.V., Mischenko S.V., Sotskaya N.V., Tkachyov A.G., Vigdorovich V.I., Dolgikh O.V. Activation of Carbon Nanotubes by Acid. *Condensed Matter and Interphases*. 2009;11(2):101–105. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/kxfppb>

Об авторах:

Хантимеров Сергей Мансурович, кандидат физико-математических наук, руководитель КФТИ – обособленного структурного подразделения ФИЦ КазНЦ РАН (420029, г. Казань, ул. Сибирский тракт, д. 10/7), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4385-3268>, Researcher ID: N-9127-2016, Scopus ID: 23502060300, SPIN-код: 6694-8272, khantim@mail.ru

Гарипов Ранис Рамисович, кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник лаборатории физики углеродных наноструктур и композитных систем КФТИ – обособленного структурного подразделения ФИЦ КазНЦ РАН (420029, г. Казань, ул. Сибирский тракт, д. 10/7), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3263-0694>, Researcher ID: AAO-7766-2021, Scopus ID: 57223588617, SPIN-код: 2653-6370, gari_rtrf@mail.ru

Емельянов Иван Андреевич, бакалавр Казанского (Приволжского) федерального университета (420008, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 18), ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1013-710X>, ban924@mail.ru

Сулейманов Наиль Муратович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник и заведующий лабораторией физики углеродных наноструктур и композитных систем КФТИ – обособленного структурного подразделения ФИЦ КазНЦ РАН (420029, г. Казань, ул. Сибирский тракт, д. 10/7, литера А), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2277-4982>, Researcher ID: ABH-4186-2020, Scopus ID: 6603867983, SPIN-код: 5237-3594, nail.suleimanov@mail.ru

Вклад авторов:

С. М. Хантимеров – формулирование идеи исследования, целей и задач; административное управление планированием и проведением 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.

Р. Р. Гарипов – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов или сбор данных; применение статистических, математических, вычислительных или других формальных методов для анализа или синтеза данных исследования; создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования и полученных данных; создание и подготовка рукописи: написание черновика рукописи, включая его перевод на иностранный язык.

И. А. Емельянов – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов или сбор данных, создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования и полученных данных.

Н. М. Сулейманов – разработка или проектирование методологии исследования; создание моделей, проверка воспроизводимости результатов экспериментов и исследования в рамках основных или дополнительных задач работы.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 11.10.2025; поступила после рецензирования 12.11.2025;
принята к публикации 10.03.2026*

About the authors:

Sergey M. Khantimerov, Cand.Sci. (Eng.), Director, ZPTI – Subdivision of FIC KazanSC of RAS (10/7 Sibirskiy Trakt St., Kazan 420029, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4385-3268>, Researcher ID: N-9127-2016, Scopus ID: 23502060300, SPIN-code: 6694-8272, khantim@mail.ru

Ranis R. Garipov, Cand.Sci. (Eng.), Junior Research Fellow in Laboratory of the Physics of Carbon Nanostructures and Composite Systems, ZPTI – Subdivision of FIC KazanSC of RAS (10/7 Sibirskiy Trakt St.,

Kazan 420029, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3263-0694>, Researcher ID: AAO-7766-2021, Scopus ID: 57223588617, SPIN-code: 2653-6370, gari_rtrf@mail.ru

Ivan A. Yemelyanov, Undergraduate Student, Kazan (Volga Region) Federal University (18 Kremlevskaya St., Kazan 420008, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1013-710X>, ban924@mail.ru

Nail M. Suleimanov, Dr.Sci. (Eng.), Leading Researcher and is a Head of the Laboratory of the Physics of Carbon Nanostructures and Composite Systems, ZPTI – Subdivision of FIC KazanSC of RAS (Lit. A, 10/7 Sibirsky Trakt St., Kazan 420029, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2277-4982>, Researcher ID: ABH-4186-2020, Scopus ID: 6603867983, SPIN-code: 5237-3594, nail.suleimanov@mail.ru

Authors contribution:

S. M. Khantimerov – ideas; formulation or evolution of overarching research goals and aims; management and coordination responsibility for the research activity planning and execution; preparation, creation and presentation of the published work by those from the original research group, specifically critical review, commentary or revision – including pre- or post-publication stages.

R. R. Garipov – conducting a research and investigation process, specifically performing the experiments, or data; application of statistical, mathematical, computational, or other formal techniques to analyses or synthesize study data; preparation, creation and presentation of the published work, specifically visualization; preparation, creation and presentation of the published work, specifically writing the initial draft (including substantive translation).

I. A. Emelyanov – conducting a research and investigation process, specifically performing the experiments, or data, preparation, creation and presentation of the published work, specifically visualization.

N. M. Suleimanov – development or design of methodology; creation of models, verification, whether as a part of the activity or separate, of the overall replication, reproducibility of results, experiments and other research outputs.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 11.10.2025; revised 12.11.2025; accepted 10.03.2026

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) Заключение (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.** В данном разделе полученные данные аналитически осмысливаются, обобщаются и разъясняются, изложение выстраивается от частного к общему. Повторяются цель, гипотезы и методология; результаты соотносятся с литературой; предлагаются альтернативные объяснения выводам других исследований.

6) **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, $\sqrt{\text{квадратного корня}}$) 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) 25-44-39.

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) 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.* In this section, the data obtained are analyzed, summarized, and explained; the data are presented from the particular to the general. In this section, it is necessary to compare the results obtained with the study aim outlined at the beginning of the article. The study results are compared with the literature on the study topic and alternative explanations for the findings of other studies are proposed.

6) **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) 254439.

Alexey P. Levitsev – 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 – *А. В. Савонина, С. Х. Зинина*
Перевод *Н. Н. Плеханковой*
Компьютерная верстка *Е. П. Гординой*
Информационная поддержка *Р. В. Карасева*

Территория распространения – Российская Федерация, зарубежные страны.

Подписано в печать 14.09.2026 г. Дата выхода в свет 30.09.2026 г.

Формат $70 \times 100 \frac{1}{16}$. Усл. печ. л. 18.53.

Тираж 1 000 экз. 1 завод – 100 экз. Заказ № 533. 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 *A. V. Savonina, S. H. Zinina*
Translation *N. N. Plekhankova*
Desktop publishing *E. P. Gordina*
Informational support *R. V. Karasev*

Distributed in Russian Federation and foreign countries.

Signed to print 14.09.2026. Date of publishing 30.09.2026.

Sheet size $70 \times 100 \frac{1}{16}$. Conventional printed sheets 18.53.

Number of copies 1 000. 1st edition – 100 copies. Order no. 533. Free price.

Address of Printing Office: 24 Sovetskaya St., Saransk 430005, Republic of Mordovia, Russian Federation
(Publishing Office of National Reserch Mordovia State University)