

ISSN 2658-4123
eISSN 2658-6525

**ИНЖЕНЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
И СИСТЕМЫ
ENGINEERING TECHNOLOGIES
AND SYSTEMS**

2026 Том **36** № **1**
Vol. No.

DOI: 10.15507/2658-4123

<https://doi.org/10.15507/2658-4123.036.202601>

ISSN 2658-4123
eISSN 2658-6525

Том 36, № 1. 2026

Vol. 36, no. 1. 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

SCIENTIFIC JOURNAL

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

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

Главный редактор П. В. Сенин

Editor-in-Chef P. V. Senin

Предыдущее название (до 2019 года):
Вестник Мордовского университета

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, руководитель Высшей школы развития научно-образовательного потенциала Национального исследовательского Мордовского государственного университета, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3400-7780>, vice-rector-innov@adm.mrsu.ru (Саранск, Российская Федерация)

Левцев Алексей Павлович – *заместитель главного редактора*, 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. Лещанкина Национального исследовательского Мордовского государственного университета, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3758-7066>, chatkinm@yandex.ru (Саранск, Российская Федерация)

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

Аллахвердиев Сурхай Рагим оглы – доктор биологических наук, академик Российской Академии Естествознания, профессор кафедры экологии и природопользования Московского педагогического государственного университета (Москва, Российская Федерация); профессор кафедры лесной индустрии Барьтинского 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 технологий и оборудования производства и переработки продукции животноводства Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3224-6833> (Симферополь, Российская Федерация)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

EDITORIAL BOARD

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

Alexey P. 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. Gorbatov Federal Research Center of Food Systems, Russian Academy of Sciences, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3573-930X> (Moscow, Russian Federation)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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, Chief Scientific Officer of the Laboratory of Optical Spectroscopy of Laser Materials, National Research Mordovia State University, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8503-8486> (Saransk, Russian Federation)

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

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

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

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

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

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

Oлга 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

| | |
|--|-----|
| Припоров И. Е., Курасов В. С., Бацунов В. И. Моделирование процесса вертикальной обработки почвы турбодисковым культиватором для территорий Крыма | 10 |
| Гербер Ю. Б., Калиновская Т. В., Брановицкая Т. Ю. Реологические свойства продуктов на молочной основе, обогащенных пектиносодержащим пюре кизила (<i>Cornus mas L.</i>) | 41 |
| Успенский И. А., Рамазанова Г. Г., Костенко М. Ю., Гаджиев П. И. Повышение эффективности комбайновой уборки картофеля: динамическое обоснование параметров комкоразрушающего устройства | 59 |
| Крупенин П. Ю., Рендов А. К., Кузюр В. М., Будко С. И., Купряшкин В. Ф., Уланов А. С. Применение аддитивных технологий для моделирования механических характеристик ягод клюквы круноплодной | 81 |
| Бухке П., Маюри А.В.Р. Гибридный подход к диагностике заболеваний листьев томатов, основанный на глубоком обучении и спектрально-текстурном анализе (на англ. яз.) | 97 |
| 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 | 114 |
| Савельев А. П., Джаббаров Н. И., Петров С. А. Адаптивное управление микроклиматом в кабине мобильного энергетического средства на основе прогнозирования методом экспоненциального сглаживания | 140 |

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ, ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ И ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ

| | |
|---|-----|
| Левцев А. П., Ениватов А. В. Теплопередача через ограждающие конструкции здания в условиях возрастания температуры наружного воздуха и пульсации температуры теплоносителя | 158 |
|---|-----|

МАШИНОСТРОЕНИЕ

| | |
|--|-----|
| Астахов М. В., Славкина Е. В. Управление жесткостью конструкции сельскохозяйственной техники в процессе ее эксплуатации | 183 |
|--|-----|

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ

| | |
|--|-----|
| Аникеева К. Г., Сафин Р. Р. Физико-химические характеристики древесного наполнителя, прошедшего двухступенчатую обработку | 204 |
| <i>Информация для авторов и читателей</i> | 221 |

CONTENTS

TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT

| | |
|--|-----|
| Priporov I. E., Kurasov V. S., Bacunov V. I. Simulating the Process of Vertical Tillage with a Turbo-Disc Cultivator for the Territories of Crimea | 10 |
| Gerber Y. B., Kalinovskaya T. V., Branovitskaya T. Y. Rheological Properties of Milk-Based Products Enriched With Pectin-Containing Dogwood Puree (Cornus mas L.) | 41 |
| Uspenskiy I. A., Ramazanova G. G., Kostenko M. Y., Gadzhiev P. I. Improving the Efficiency of Combine-Harvesting Potatoes: Dynamic Substantiation of Soil Clod-Breaking Device Parameters | 59 |
| Krupenin P. Y., Rendov A. K., Kuzyur V. M., Budko S. I., Kupryashki V. F., Ulanov A. S. Application of Additive Technologies for Simulating Mechanical Characteristics of Large-Fruited Cranberries | 81 |
| Buchke P., Mayuri A.V.R. A Hybrid Explainable Deep Learning and Spectral-Texture Ensemble Approach for Tomato Leaf Disease Diagnosis | 97 |
| Mudarisov S. G., Miftakhov I. R., Farkhutdinov I. M., Shafeeva E. I. Development of a Low-Power Onboard System for Point Detection of Wheat Diseases Using a Modified YOLO Architecture | 114 |
| Savelyev A. P., Jabborov N. I., Petrov S. A. Adaptive Control of the Microclimate in the Cabin of a Mobile Energy Vehicle Based on Forecasting by Exponential Smoothing | 140 |

ELECTRICAL TECHNOLOGY, ELECTRICAL EQUIPMENT AND ENERGY CONSERVATION

| | |
|---|-----|
| Levtsev A. P., Enivatov A. V. Heat Transfer through Building Envelopes in the Conditions of Increasing Outdoor Air Temperature and Coolant Temperature Fluctuation | 158 |
|---|-----|

MECHANICAL ENGINEERING

| | |
|---|-----|
| Astakhov M. V., Slavkina E. V. Control of the Structural Rigidity of Agricultural Machinery During its Operation | 183 |
|---|-----|

INSTRUMENTS AND METHODS OF EXPERIMENTAL PHYSICS

| | |
|--|-----|
| Anikeeva K. G., Safin R. R. Physical and Chemical Characteristics of Wood Filler Two-Stage Processing | 204 |
|--|-----|

| | |
|---|-----|
| <i>Information for Authors and Readers of the Journal</i> | 221 |
|---|-----|

**ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ /
TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT**<https://doi.org/10.15507/2658-4123.036.202601.010-040>EDN: <https://elibrary.ru/ipexzh>

УДК / UDK 631.517

*Оригинальная статья / Original article***Моделирование процесса вертикальной
обработки почвы турбодисковым
культиватором для территорий Крыма****И. Е. Припоров** ✉, **В. С. Курасов**, **В. И. Бацунов***Кубанский государственный аграрный
университет имени И. Т. Трубилина,**г. Краснодар, Российская Федерация, <https://ror.org/058jafb94>*✉ i.priporov@yandex.ru*Аннотация*

Введение. Перспективным способом обработки пахотного слоя является вертикальная обработка почвы сельскохозяйственной техникой с дисковыми рабочими органами. Применение таких агрегатов направлено на измельчение и частичную заделку растительных остатков в почву с минимальным ее повреждением, что приводит к повышению урожайности. Однако исследований по моделированию процесса вертикальной обработки почвы турбодисковым культиватором проведено недостаточно.

Цель исследования. Провести моделирование процесса вертикальной обработки почвы разработанным турбодисковым культиватором для повышения его производительности.

Материалы и методы. В качестве объекта исследования представлена конструкция модернизированного турбодискового культиватора (патент РФ № 2825223). Метод исследований основан на положениях теоретической механики и математики. Достоверность полученных зависимостей производительности от количества волн на волнистом диске при скорости 18 км/ч и длине игл 0,2565 и 0,3195 м проверяли по критерию Кохрена.

Результаты исследований. Приведена блок-схема алгоритмов вертикальной обработки почвы разработанным турбодисковым культиватором и оптимизации его производительности. Получены проекции скорости точки.

Обсуждение и заключение. При скорости движения машинно-тракторного агрегата 15 км/ч, длине иглы 0,2565 м и изменении диаметра волнистого диска от 0,343 до 0,559 м производительность повышается с 3,72 до 4,37 га/ч при количестве лопаток – 4 шт. на игольчатом диске; при 6 лопатках – 5,46–6,41 га/ч и 8 лопатках – 7,20–8,45 га/ч. Обоснование рациональной производительности турбодискового культиватора для вертикальной обработки почвы, усовершенствованная его конструкция по патенту РФ № 2825223, а также блок-схема алгоритма, позволяющая выбрать оптимальную производительность турбодискового культиватора при различных режимных показателях и конструктивных параметрах игольчатого и волнистого дисков, является практически значимой для исследований в сфере сельского хозяйства. Перспективы исследования – разработка и поиск новых технических решений для модернизации конструкций рабочих органов турбодискового культиватора для снижения энергоемкости и повышения его производительности.

© Припоров И. Е., Курасов В. С., Бацунов В. И., 2026

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

Ключевые слова: скорость машинно-тракторного агрегата, турбодисковый культиватор, растительные остатки, волнистый диск, игольчатый диск, блок-схема алгоритма, критерий Кохрена

Финансирование: работа выполнена в рамках госбюджетной тематики Кубанского ГАУ (№ 121032300060-2), 2026–2030 гг.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Припоров И.Е., Курасов В.С., Бацунов В.И. Моделирование процесса вертикальной обработки почвы турбодисковым культиватором для территорий Крыма. *Инженерные технологии и системы*. 2026;36(1):10–40. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.036.202601.010-040>

Simulating the Process of Vertical Tillage with a Turbo-Disc Cultivator for the Territories of Crimea

I. E. Priporov , V. S. Kurasov, V. I. Bacunov

I. T. Trubilin Kuban State Agricultural University,

Krasnodar, Russian Federation, <https://ror.org/058jafb94>

 *i.priporov@yandex.ru*

Abstract

Introduction. A promising means for cultivating the arable layer is vertical tillage using agricultural machinery with disc working tools. This agricultural machinery is used to crush and partially embed plant residues into the soil with minimal soil damage that results in increased yields. However, there have not enough studies been conducted on simulating the vertical tillage process using a turbodisc cultivator.

Aim of the Study. The study is aimed at simulating the process of vertical tillage with a developed turbodisc cultivator to increase the cultivator performance.

Materials and Methods. The object of the study is the upgraded turbo-disc cultivator (RF Patent No. 2825223). The research method is based on the principles of theoretical mechanics and mathematics. There was used the Cochran criterion to confirm the reliability of the obtained dependences of the cultivator performance on the number of waves on a wave disc at a speed of 18 km/h and needle lengths of 0.2565 and 0.3195 m.

Results. There is presented a block diagram of algorithms for vertical tillage with a developed turbodisc cultivator and the cultivator performance optimization. There have been found the projections of the point velocity.

Discussion and conclusion. When the the tractor-machine unit speed is of 15 km/h, the needle length is 0.2565 m and the wave disc diameter is from 0.343 to 0.559 m, the productivity increases from 3.72 to 4.37 ha/h with 4 blades on the needle disc, from 5.46 to 6.41 ha/h with 6 blades and from 7.20 to 8.45 ha/h with 8 blades. The practical significance of the research is the substantiation of the rational performance of the turbo-disc cultivator for vertical tillage, as well as the block diagram of the algorithm, which will allow you to choose the optimal performance of the turbo-disc cultivator under various regime indicators and design parameters of the needle and wavy discs. The prospects of the research are the development and search for new technical solutions to improve the design of the working bodies of the turbo-disc cultivator, which will reduce its energy consumption and increase its productivity.

Keywords: machine and tractor unit speed, turbodisc cultivator, plant residues, wave disc, needle disk, the block diagram of the algorithm, Cochran's criterion

Funding: The work was carried out within the framework of the state budget matter of the Kuban State Agrarian University (№ 121032300060-2), 2026–2030.

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

For citation: Priporov I.E., Kurasov V.S., Bacunov V.I. Simulating the Process of Vertical Tillage with a Turbo-Disc Cultivator for the Territories of Crimea. *Engineering Technologies and Systems*. 2026;36(1):10–40. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.036.202601.010-040>

ВВЕДЕНИЕ

Интенсификация сельского хозяйства сопровождается значительным увеличением производительности почвообрабатывающих машин (ПОМ), что в процессе обработки почвы приводит к усилению переуплотнения подпочвенных слоев, потере влаги, развитию водной и ветровой эрозии. В результате снижается плодородие земли, растут потери урожая и себестоимость производимой продукции. Вопрос обеспечения населения продовольствием собственного производства в современных условиях является приоритетным направлением, поэтому усовершенствование ПОМ, воздействующих на верхний плодородный слой почвы, представляет собой важную задачу [1]. Применяемые средства механизации для обработки почвы основных сельскохозяйственных культур не соответствуют зональным почвенно-климатическим и производственным условиям. Поэтому дальнейшее наращивание производства сельскохозяйственной продукции в рыночных условиях невозможно без внедрения научно обоснованных технологий и систем обработки почвы.

Среди сельскохозяйственных машин представлены почвообрабатывающие агрегаты с разным набором рабочих органов и количеством выполняемых операций, вследствие чего производителям сложно выбрать из множества представленных образцов [1; 2]. Выбор ПОМ осуществляется по конструктивным и эксплуатационным свойствам турбодисковых культиваторов (ТДК)¹.

При внесении в почву растительных остатков (РО) сельскохозяйственных культур существует проблема их измельчения на частицы размером не более 15 см и дополнительного расщепления на части для последующего разложения. Несмотря на разнообразие почвообрабатывающих агрегатов, в настоящее время отсутствуют ПОМ по измельчению высокостебельных культур [3; 4]. Перспективными представляются агрегаты с пассивными рабочими органами. Анализ конструкций ПОМ и рабочих органов для послеуборочного измельчения РО имеет большое значение [3; 5].

В качестве альтернативной природоохранной подготовки пахотного слоя, способной интенсивно удалять РО, защищая почву и окружающую среду, предложена вертикальная обработка почвы (ВОП). Многие производители сельскохозяйственной техники, например Great Plains (Салина, Канзас, США), выпускали свои машины для ВОП. Z. Zeng и Y. Chen изучили условия обработки почвы [6]. Данный вид обработки позволяет увеличить урожайность до 8,5 ц/га, что в условиях засушливого Крыма представляется трудной задачей. Основная особенность ВОП заключается в минимизации слоев структуры почвы, обладающей повышенной плотностью в зоне заделки семян. При вертикальной обработке корневая система сельскохозяйственных культур вегетативно развивается в разные стороны и вглубь,

¹ Точицкий А.А., Лепешкин Н.Д., Костюков П.П., Козлов Н.С. Почвовлагодобывающие технологии и средства механизации обработки легких почв в Республике Беларусь. В: Механизация и электрификация сельского хозяйства: сб. статей. Минск: РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»; 2012. С. 3–10. <https://elibrary.ru/zsfzyr>; Лепешкин Н.Д., Точицкий А.А., Добрян В.В. Анализ типа почвообрабатывающей части современных почвообрабатывающих посевных машин и ее рабочих органов. В: Механизация и электрификация сельского хозяйства: сб. статей. Минск: РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»; 2010. С. 65–73. <https://www.elibrary.ru/ywdxxn>

что позволяет растениям быть более засухоустойчивыми за счет взятия влаги из более низких горизонтов [7].

Преыдушие исследования показали многообещающие результаты применения ВОП с точки зрения сохранения воды, а также увеличения урожайности². Однако моделированию процесса вертикальной обработки почвы ТДК было уделено недостаточно внимания.

Целью исследования является повышение производительности турбодискового культиватора путем моделирования процесса ВОП. Задачи исследования включают в себя разработку конструкции ТДК для вертикальной обработки почвы с заделкой стерни, построение блок-схем по определению рациональной производительности ТДК в зависимости от конструктивных параметров дисковых рабочих органов (ДРО), его эксплуатационных показателей и выполнения технологического процесса ВОП. Необходимо определить направления скорости и ускорений рассматриваемой точки лопатки игольчатого диска, построить графики по изменению направляющего косинуса проекции скорости и ускорений на оси координат, построить зависимости производительности от количества волн на волнистом диске при $\vartheta_m = 18$ км/ч, $L_1 = 0,2565$ м и $L_1 = 0,3195$ м; представить результаты моделирования экспериментального машинно-тракторного агрегата в зависимости от конструктивных параметров волнистого диска, длины иглы игольчатого диска и скорости движения ТДК.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В настоящее время проведен анализ взаимодействия дисковых рабочих органов и рассмотрена кинематика движения при проектировании орудий³. Установлена связь бионического профиля ДРО с качеством обработки почвы. Выяснено, что стойкость его поверхности снижается при взаимодействии с негладкими поверхностями тел жуков землероек. Проведены эксперименты по снижению тягового сопротивления ДРО в сравнении с серийными рабочими органами [7; 8]. В. П. Горячкин на основании теории трехгранного клина обосновал силу тяги в горизонтальном направлении при взаимодействии сферического диска с поверхностью почвы [7].

Известно, что поверхностная обработка почвы без оборота пласта с сохранением растительных остатков способствует экономии ресурсов и защите от эрозии [9–11].

Коллектив ученых из Донского технического университета разработал математическую модель движения отвала культиватора с пружинными зубьями, учитывающую их конфигурацию и режим вибрации [12].

Решающее практическое значение для сельскохозяйственных машин имеет теория устойчивости движения, поскольку от нее зависит работа в технологическом процессе. Рассмотренные методы расчета и примеры их применения оценивают

² Chen Y., Dampousse S., Li H. Vertical Tillage and Vertical Seeding. In: CSBE/SCGAB 2016 Annual Conference. Halifax; 2016. URL: <https://library.csbe-scgab.ca/all-publications/3277:vertical-tillage-and-vertical-seeding> (дата обращения: 25.04.2025); Klingberg K., Weisenbeck C. Shallow Vertical Tillage: Impact on Soil Disturbance and Crop Residue. In: Proceedings of the 2011 Wisconsin Crop Management Conference; 2011. URL: <https://extension.soils.wisc.edu/wcmc/shallow-vertical-tillage-impact-on-soil-disturbance-and-crop-residue/> (дата обращения: 25.04.2025); Watters H.D., Douridas N.N. Soybean Seeding Rates by Tillage: No-Till vs Vertical Till. The Ohio State University; 2013.

³ Синеоков Г.Н., Панов И.М. Теория и расчет почвообрабатывающих машин. М.: Машиностроение; 1977. 328 с.

работоспособность сложных динамических систем без численного решения сложных дифференциальных уравнений движения при наличии внешних возмущений [13].

Учеными из Судана и Индонезии проведено исследование производительности культиватора Mотоуама MTE 70NL при вторичной обработке почвы в дождливую погоду и в условиях отсутствия дождя [14]. Погодный фактор в виде наличия дождя использовался в качестве параметра для сравнения производительности агромашины в сухую погоду [15].

Разработан комбинированный культиватор и дисковая борона (С-DH), которые имеют среднюю производительность 0,30 и 0,61 га/ч, скорость $\vartheta = 1,8$ и 3,4 км/ч соответственно. Общая эффективность выражена в виде индекса производительности (548,54) при глубине 13 см и $\vartheta = 3,4$ км/ч [16].

Для обеспечения взаимодействия лапы культиватора с почвой и прогнозирования поведения почвы в разных условиях коллектив ученых из Винницкого аграрного университета разработал математическую модель, которая оптимизирует конструкцию культиватора по производительности [17].

И. В. Соболевский на основе биосистемного подхода разработал новую конструкцию рабочего органа дисковой бороны (патент РФ № 173 238) и аналитически обосновал ее конструктивные параметры, что позволило снизить тяговое сопротивление на 14 % по сравнению с серийным органом бороны [7].

Разработана ПОМ с текстурированным крылом лопаты. На основе сочетания моделирования с дискретными элементами и цифрового теста проверки траншеи в почве изучено влияние структурных параметров текстуры поверхности на тяговое сопротивление и скорость дробления машиной⁴ [18].

Учеными из Кореи оценена производительность электрического многоцелевого культиватора методом имитационного анализа в программе Simulation X с учетом технических характеристик деталей [19].

Для повышения производительности полевого культиватора на заводе сельскохозяйственной техники Kenana (KAIF) с целью выполнения нескольких операций разработан комбинированный культиватор, позволяющий осуществлять рыхление борозд и внесение удобрений. Для снижения тягового сопротивления на 10–15 % и улучшения крошения почвы существует его модель с механизмом регулирования [20; 21].

А. Р. Валиевым получены оптимальные значения конструктивно-технологических параметров культиватора с парнодисковыми рабочими органами, которые имеют отдельные секции [22; 23].

Спроектирована и усовершенствована пассивно-активная комбинированная ПОМ (культиватор спереди и ротавадор сзади). Крутящий момент вала отбора мощности для ее работы составляет 28 % с одним ротавадором. Объем обрабатываемой почвы, снижение ее прочности и затрат энергии на топливо включены для обоих орудий в общую производительность [24].

По мнению Н. Hosseini, А. Farzad и F. Majeed производительность разработанного культиватора основывается на методах квазиньютоновской оптимизации и генетического алгоритма, которые сопоставимы с классическими методами [25].

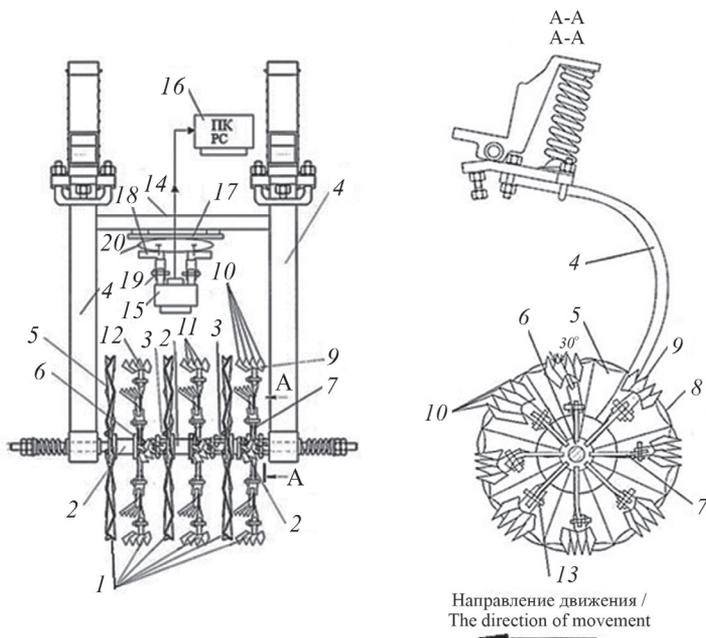
⁴ Gao X. Research on the Influencing Factors and Cultivation Effects of Subsoiled Soil Structure between Rows. Ph.D. Thesis, Northwest A&F University, Yangling; 2018.

В теоретических исследованиях отсутствует выражение для определения производительности ТДК в зависимости от конструктивных параметров волнистого и игольчатого дисков и режимного его показателя, а также блок-схема алгоритма по выбору рациональной производительности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Оборудование

Для устранения выявленных недостатков, которые присущи турбодисковым культиваторам, проведена его модернизация (рис. 1), позволяющая снизить тяговое сопротивление с одновременным повышением качества заделки растительных остатков и расширением функциональных возможностей по обеспечению их контроля. На разработанную конструкцию получен патент РФ № 2825223.



Р и с. 1. Конструктивно-технологическая схема турбодискового культиватора:

a) общий вид; b) вид сбоку:

1 – диски; 2 – батарея; 3 – шарниры; 4 – стойка; 5 – рифленные диски; 6 – игольчатые диски; 7 – игла; 8 – окружность; 9 – лопатки зубчатые; 10 – вершина; 11 – впадина; 12 – скребок; 13, 19 – стопорные болты; 14 – рама; 15 – мультимедийное устройство; 16 – персональный компьютер; 17 – каретки; 18 – телескопические стойки; 20 – механизм поворотный

F i g. 1. Design and technological scheme of the turbo-disc cultivator:

a) general view; b) side view:

1 – discs; 2 – battery; 3 – hinges; 4 – rack; 5 – wave discs; 6 – needle discs; 7 – needle; 8 – circle; 9 – toothed blades; 10 – vertex; 11 – cavity; 12 – scraper; 13, 19 – locking bolts; 14 – frame; 15 – multimedia device; 16 – personal computer; 17 – carriages; 18 – telescopic racks; 20 – rotary mechanism

Примечание: ПК – персональный компьютер; А – вид; А-А – сечение.

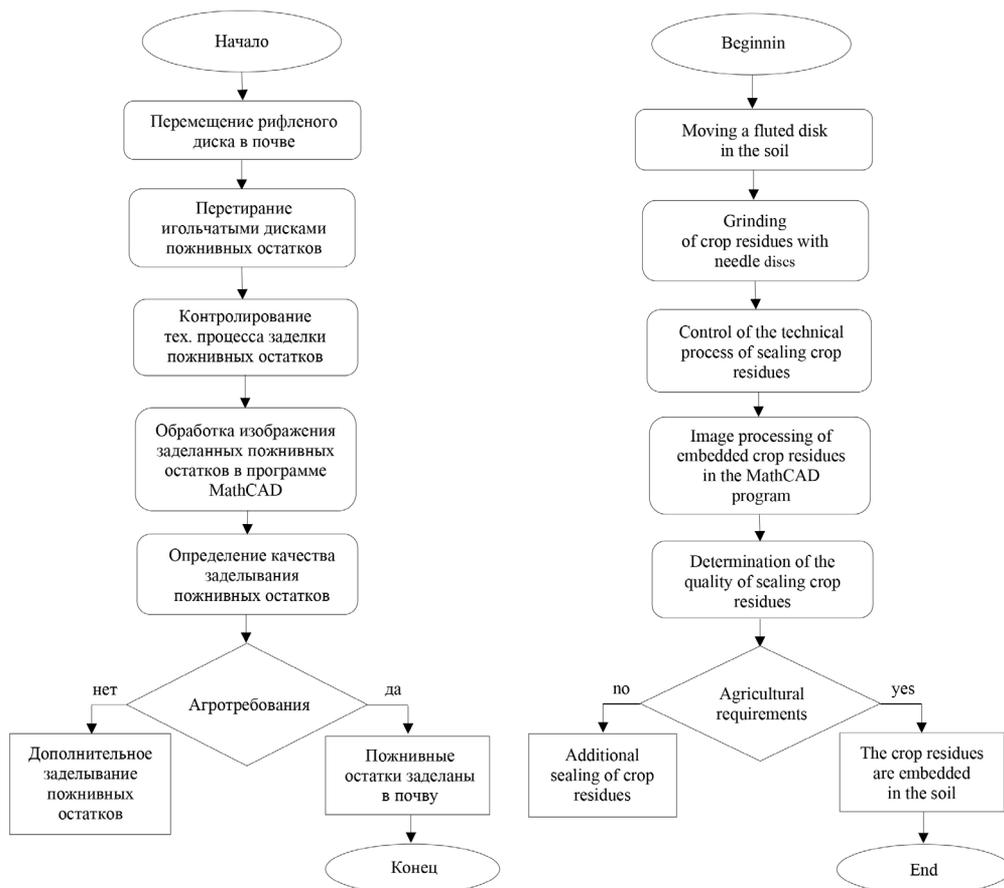
Note: ПК – personal computer; А – view; А-А – section.

Источник: рисунок взят из статьи [26].

Source: the picture is taken from the article [26].

Процедура исследования

Дисковые рабочие органы (рифленые и игольчатые) выбрали по конструктивным параметрам. Рифленые диски перемещались в почве и совершали вращательные движения независимо друг от друга, а игольчатый диск перетирали пожнивные остатки. Мультимедийное устройство, на котором проводили настройку экспозиции камеры в зависимости от яркости дневного света и освещенности, производило съемку, осуществляя контроль технологического процесса заделки пожнивных остатков. Полученное изображение подавали на обработку в программе *Mathcad* для определения качества заделки РО по агротехническим требованиям. При несоответствии требованиям проводили контроль технологического процесса работы игольчатых дисков (рис. 2).



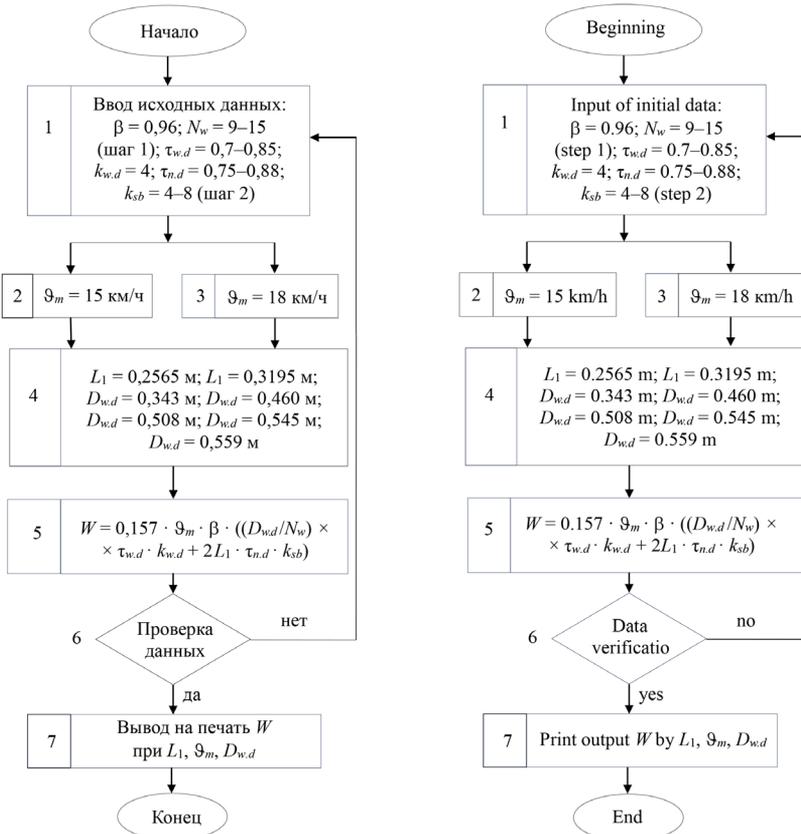
Р и с. 2. Блок-схема алгоритма вертикальной обработки почвы турбодисковым культиватором

F i g. 2. The block-diagram of the algorithm for vertical tillage with a turbodisk cultivator

Источник: рисунки 2–4 составлены авторами статьи в программе Компас-3D v18.

Source: figures 2–4 were compiled by the authors of the article in the Compass-3D v18 program.

На основании технологического процесса ВОП предложена блок-схема, приведенная на рисунке 3, которая позволила определить производительность ТДК в зависимости от конструктивных параметров дисковых рабочих органов и эксплуатационных показателей культиватора. Она состоит из семи операторов. Первый включает ввод исходных данных с ограничениями и передает управление 2–3 блокам для расчета параметров по каждому из вариантов скорости движения агрегата, состоящего из трактора и ТДК моделей Агрифест-Экспресс, Salford и др. Для каждой скорости ϑ_m ввели дополнительные данные (блок 4): длина иглы с лопаткой L_1 , диаметр волнистых дисков $D_{w.d}$.



Р и с. 3. Блок-схема алгоритма оптимизации производительности турбодискового культиватора
F i g. 3. The block-diagram of the performance optimization algorithm for a turbodisc cultivator

Примечание: β – коэффициент использования конструктивной ширины захвата; N_w – количество волн, шт.; $\tau_{w.d}$, $\tau_{n.d}$ – коэффициент использования времени смены соответственно волнистых дисков и игольчатых дисков; $k_{w.d}$ – количество волнистых дисков, шт.; k_{sb} – количество лопаток, шт.; ϑ_m – скорость движения, км/ч; L_1 – длина иглы с лопаткой, м; $D_{w.d}$ – диаметр волнистого диска, м; W – производительность турбодискового культиватора, га/ч.

Note: β – coefficient of use of the operating width; N_w – number of waves, pcs.; $\tau_{w.d}$, $\tau_{n.d}$ – time-use factor for wavy discs and needle discs, respectively, the time usage factor for changing wave discs and needle discs; $k_{w.d}$ – number of wave discs, pcs.; k_{sb} – number of blades, pcs.; ϑ_m – the speed of movement, km/h.; L_1 – length of needle with blade, m; $D_{w.d}$ – diameter of the wave disk, m; W – performance of a turbodisc cultivator.

В 5 арифметическом операторе рассчитывается производительность турбодискового культиватора по выведенной формуле для каждой скорости движения и длины иглы с лопаткой игольчатого диска. Ширина захвата культиватора – 3 м.

Предварительно логический оператор 6 проверяет: со всеми ли исходными данными выполнены расчеты.

По максимальному значению критерия оптимизации диаметра волнистого диска при каждой скорости движения и длине иглы с лопаткой игольчатого диска оператор 7 выводит на печать W , дает команду остановки расчета.

Качественные показатели технологического процесса: сохранение и заделывание пожнивных остатков в почву, глубина обработки, качество крошения почвы.

Ограничение скорости турбодискового культиватора происходило исходя из средней скорости его движения (15–18 км/ч).

В качестве изменяющихся показателей ДРО выбрано по игольчатому диску – количество лопаток (4–8), длина иглы с лопаткой $L_1 = 0,2565–0,3195$ м; волнистому диску – количество волн (9–15), диаметр (0,343–0,559 м), постоянных – количество волнистых дисков.

Анализ данных

На основе уравнения траекторий движения игольчатого диска с лопатками по времени [26] получены проекции скорости точки, которые позволили определить направления скорости и ускорений рассматриваемой точки A лопатки игольчатого диска (рис. 4) с помощью направляющих косинусов:

$$\cos(\widehat{V, x}) = \frac{\sqrt{(1 + \cos\varphi_{n.d})}}{1,41}, \quad (1)$$

$$\cos(\widehat{V, y}) = -\frac{\sin\varphi_{n.d}}{1,41\sqrt{(1 + \cos\varphi_{n.d})}}. \quad (2)$$

где V – проекция скорости на ось x , м/с; x, y – оси координат, на которые проецируются скорости точки; $\varphi_{n.d}$ – угол поворота игольчатого диска, град.

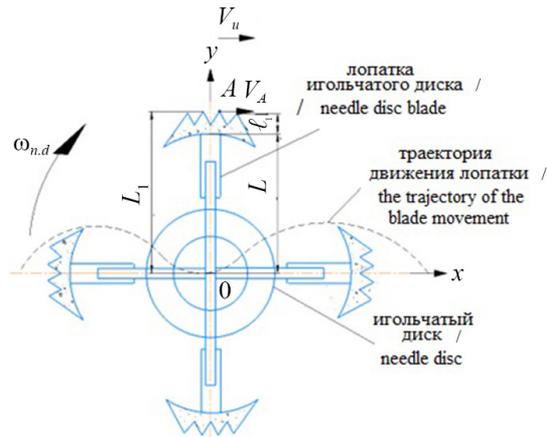
Направляющие косинуса выражения (1) и (2) для определения направления проекций скоростей изменялись по косинусоидальному закону (рис. 5, 6).

Направляющий косинус $\cos(\widehat{V, x}) = 0$ и $\cos(\widehat{V, y}) = 0$ при угле поворота 180° .

$$\begin{aligned} \cos(\widehat{a, x}) &= -\sin\varphi_{n.d} \\ \cos(\widehat{a, y}) &= -\cos\varphi_{n.d}. \end{aligned} \quad (4)$$

Направляющие косинуса $\cos(\widehat{a, x})$ для определения направления проекций ускорений изменялись по синусоидальному (рис. 7) и $\cos(\widehat{a, y})$ – косинусоидальному закону (рис. 8).

Направляющий косинус $\cos(\widehat{a, x}) = 0$ при угле поворота 180° и $\cos(\widehat{a, y}) = 0$ при 90° и 270° .

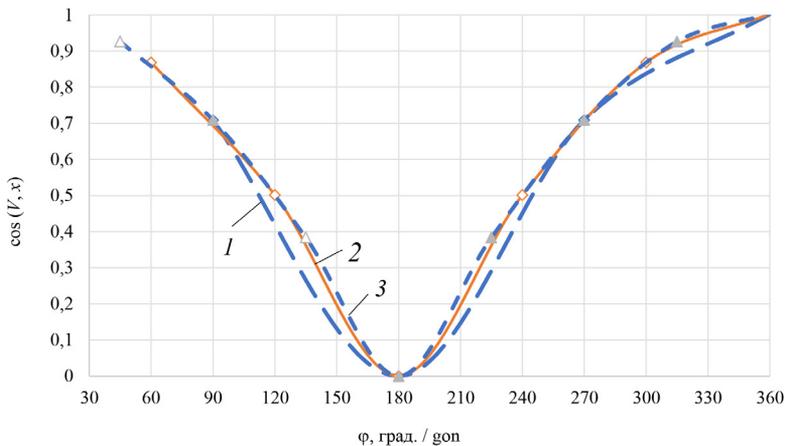


Р и с. 4. Траектория движения игольчатого диска

F i g. 4. The trajectory of the needle disc

Примечание: $\omega_{n,d}$ – угловая скорость игольчатого диска, s^{-1} ; V_u – скорость движения агрегата, км/ч; V_A – скорость точки A , м/с; ℓ_1 – длина лопатки, м; L – длина иглы, м; L_1 – длина иглы с лопаткой, м; A – точка на лопатке; x, y – оси координат.

Note: $\omega_{n,d}$ – angular velocity of the needle disc, s^{-1} ; V_u – the speed of movement of the unit, m/s; V_A – velocity of point A , m/s; ℓ_1 – length of the blade, m; L – length of the needle, m; L_1 – length of the needle with the blade, m; A – point on the blade; x, y – coordinate axes.

Р и с. 5. Графики по изменению направляющего косинуса проекции скорости на ось x :

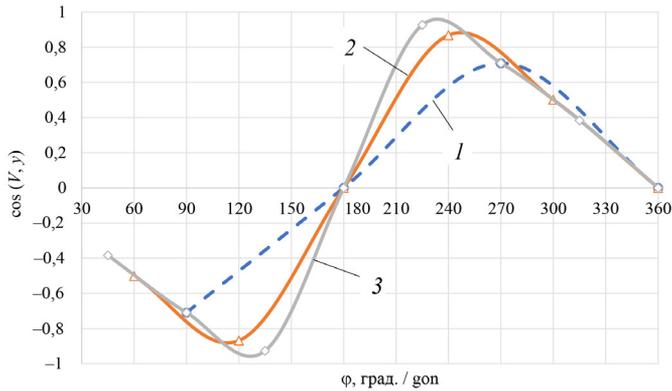
1 – 4 лопатки; 2 – 6 лопаток; 3 – 8 лопаток

F i g. 5. The graphs of the changes in the directional cosine of the velocity projection on the x -axis:

1 – 4 blades; 2 – 6 blades; 3 – 8 blades

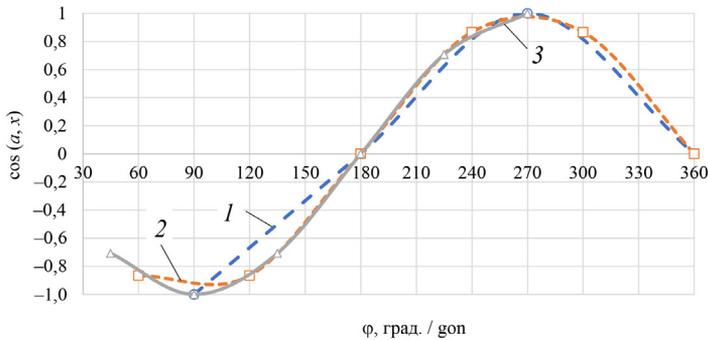
Источник: рисунки 5–8 составлены авторам статьи в программе *Microsoft Excel*.

Source: figures 5–8 are compiled for the authors of the article in the program *Microsoft Excel*.



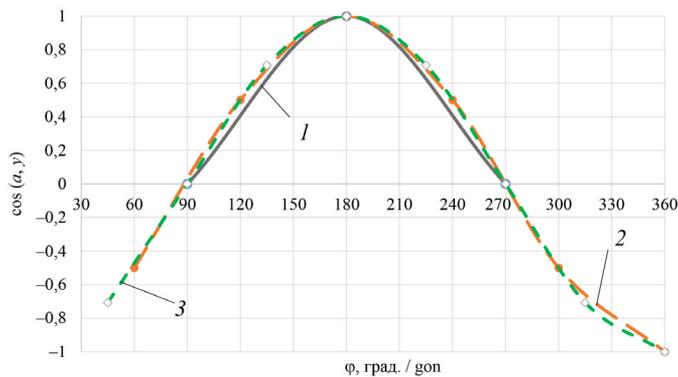
Р и с. 6. Графики по изменению направляющего косинуса проекции скорости:
 1 – 4 лопатки; 2 – 6 лопаток; 3 – 8 лопаток

F i g. 6. The graphs of changing the direction cosine of the velocity projection:
 1 – 4 blades; 2 – 6 blades; 3 – 8 blades



Р и с. 7. Графики по изменению направляющего косинуса проекции ускорения a_x :
 1 – 4 лопатки; 2 – 6 лопаток; 3 – 8 лопаток

F i g. 7. The graphs of changing the direction cosine of the acceleration projection a_x :
 1 – 4 blades; 2 – 6 blades; 3 – 8 blades



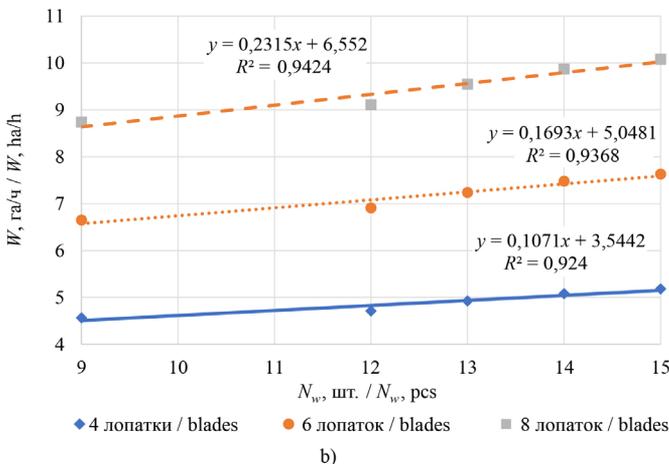
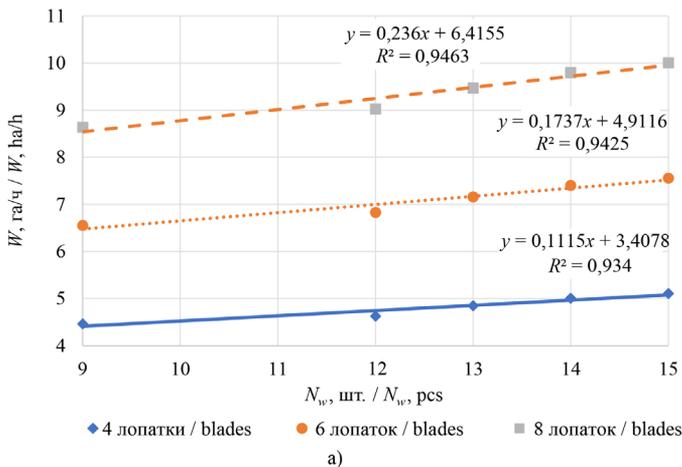
Р и с. 8. Графики по изменению направляющего косинуса проекции ускорения a_y :
 1 – 4 лопатки; 2 – 6 лопаток; 3 – 8 лопаток

F i g. 8. The graphs of changing the direction cosine of the acceleration projection a_y :
 1 – 4 blades; 2 – 6 blades; 3 – 8 blades

На основании решения задачи получены зависимости критерия оптимизации W от числа волн на волнистом диске при $\vartheta_m = 18$ км/ч, $L_1 = 0,2565$ м и $L_1 = 0,3195$ м. Достоверность полученных зависимостей производительности от количества волн на волнистом диске при скорости 18 км/ч и длине игл 0,2565 и 0,3195 м проверяли по критерию Кохрена.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ графиков на рисунках 9, 10 показывает влияние количества волн на волнистом диске на производительность ТДК, о чем свидетельствует коэффициент корреляции, который больше 0,9 в зависимости от диаметра волнистого диска и длины иглы с лопаткой при постоянной скорости движения агрегата.

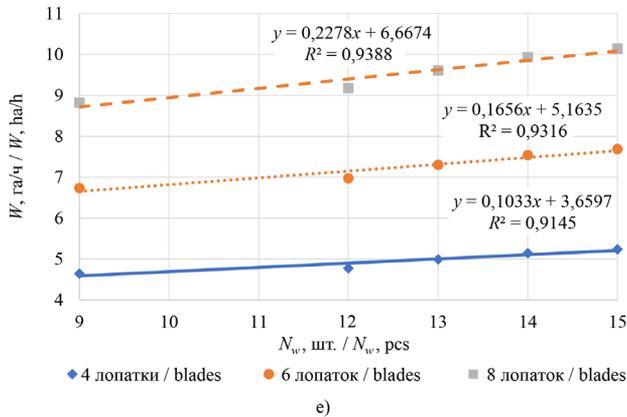
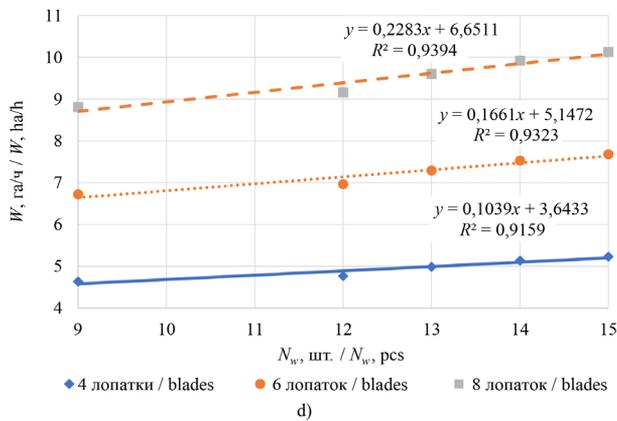
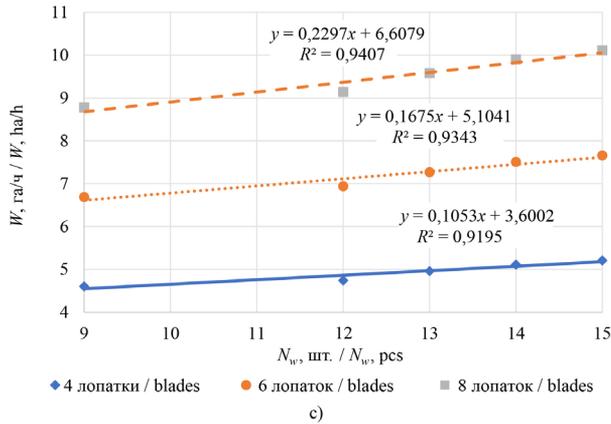


Р и с. 9. Зависимость производительности от количества волн на волнистом диске при $\vartheta_m = 18$ км/ч, $L_1 = 0,2565$ м:

a) $D_{w.d} = 0,343$ м; б) $D_{w.d} = 0,46$ м

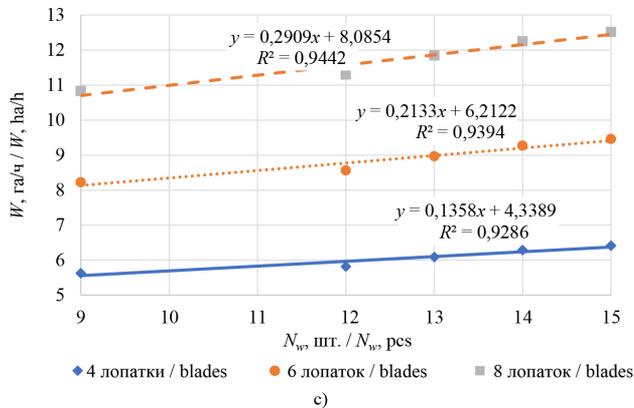
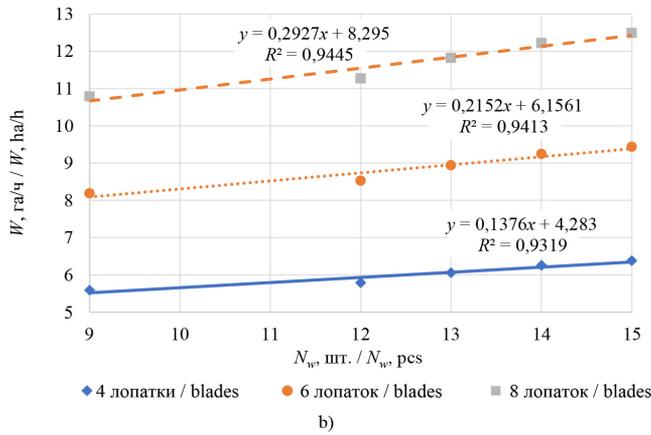
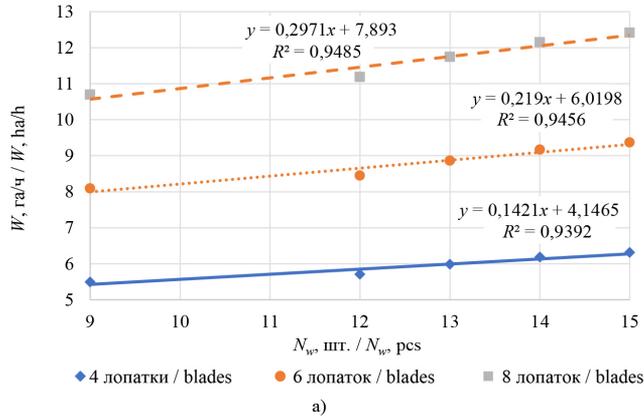
F i g. 9. The dependence of cultivator performance on the number of waves on a wave disk at $\vartheta_m = 18$ km/h, $L_1 = 0.2565$ m:

a) $D_{w.d} = 0.343$ m; б) $D_{w.d} = 0.46$ m



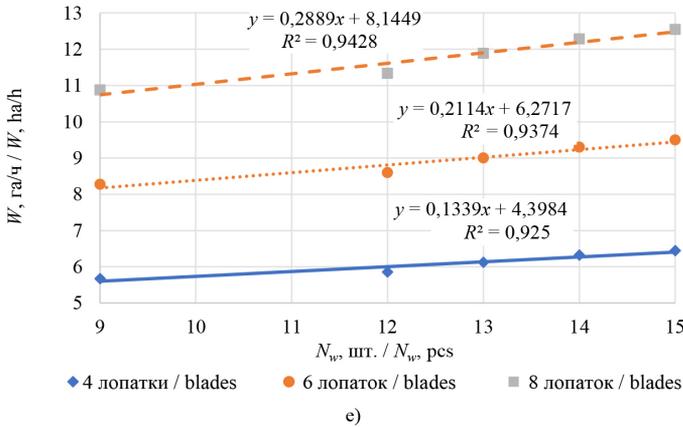
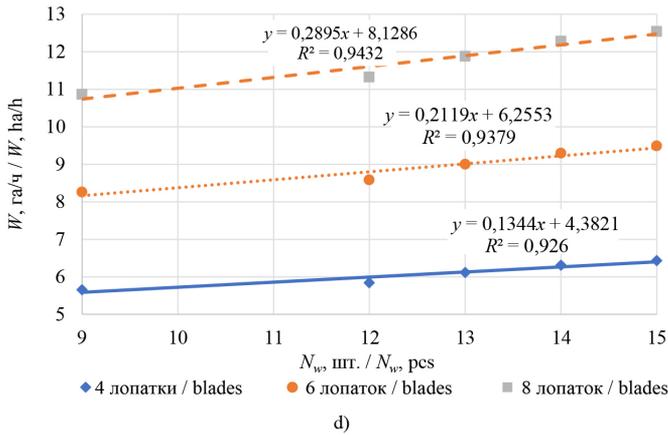
Р и с. 9. Зависимость производительности от количества волн на волнистом диске при $\vartheta_m = 18 \text{ км/ч}$, $L_1 = 0,2565 \text{ м}$:
 с) $D_{wd} = 0,508 \text{ м}$; д) $D_{wd} = 0,545 \text{ м}$; е) $D_{wd} = 0,559 \text{ м}$

F i g. 9. The dependence of cultivator performance on the number of waves on a wave disk at $\vartheta_m = 18 \text{ km/h}$, $L_1 = 0.2565 \text{ m}$:
 с) $D_{wd} = 0.508 \text{ m}$; д) $D_{wd} = 0.545 \text{ m}$; е) $D_{wd} = 0.559 \text{ m}$



Р и с. 10. Зависимость производительности от количества волн на волнистом диске при $\vartheta = 18$ км/ч, $L_1 = 0,3195$ м:
 а) $D_{wd} = 0,343$ м; б) $D_{wd} = 0,46$ м; в) $D_{wd} = 0,508$ м

F i g. 10. The dependence of cultivator performance on the number of waves on a wave disk at $\vartheta = 18$ km/h,
 $L_1 = 0.3195$ m: а) $D_{wd} = 0.343$ m; б) $D_{wd} = 0.46$ m; в) $D_{wd} = 0.508$ m



Р и с. 10. Зависимость производительности от количества волн на волнистом диске при $\vartheta_m = 18$ км/ч, $L_1 = 0,3195$ м:

д) $D_{wd} = 0,545$ м; е) $D_{wd} = 0,559$ м

F i g. 10. The dependence of cultivator performance on the number of waves on a wave disk at $\vartheta_m = 18$ км/ч,

д) $D_{wd} = 0.545$ м; е) $D_{wd} = 0.559$ м

Достоверность полученных зависимостей проверяли по критерию Кохрена. Результаты приведены в таблицах 1 и 2.

Т а б л и ц а 1

Table 1

Результаты проверки зависимостей по критерию Кохрена ($\vartheta_m = 18$ км/ч, $L_1 = 0,2565$ м)

The results of checking the dependences according the Cochran's criterion ($\vartheta_m = 18$ км/ч, $L_1 = 0.2565$ м)

| Количество лопаток, шт. / Number of blades, pcs | Расчетное значение Кохрена при диаметре волнистого диска D_{wd} / Calculated Cochran value for the diameter of a wave disk D_{wd} | | | | | $G_{\text{табл}} / G_{\text{table}}$ |
|---|---|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------------------------------|
| | 0,343 м / м | 0,460 м / м | 0,508 м / м | 0,545 м / м | 0,559 м / м | |
| 4 | 0,4516 | 0,4122 | 0,2615 | 0,2640 | 0,2646 | 0,8412 |
| 6 | 0,2445 | 0,2369 | 0,2361 | 0,2348 | 0,2351 | 0,8412 |
| 8 | 0,5237 | 0,5037 | 0,3654 | 0,5057 | 0,5061 | 0,8412 |

Т а б л и ц а 2

Table 2

Результаты проверки зависимостей по критерию Кохрена $\vartheta_m = 18$ км/ч, $L_1 = 0,3195$ м

The results of checking the dependences according the Cochran's criterion
($\vartheta_m = 18$ km/h, $L_1 = 0.3195$ m)

| Количество лопаток, шт. / Number of blades, pcs | Расчетное значение Кохрена при диаметре волнистого диска $D_{w.d}$ / Calculated Cochran value for the diameter of a wave disk $D_{w.d}$ | | | | | $G_{\text{табл}} / G_{\text{table}}$ |
|--|--|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------------------------------|
| | 0,343 м / м | 0,460 м / м | 0,508 м / м | 0,545 м / м | 0,559 м / м | |
| 4 | 0,1309 | 0,7795 | 0,4238 | 0,4563 | 0,4549 | 0,8412 |
| 6 | 0,2257 | 0,2493 | 0,2487 | 0,2478 | 0,2224 | 0,8412 |
| 8 | 0,4668 | 0,3311 | 0,6738 | 0,6814 | 0,6849 | 0,8412 |

Гипотеза об однородности дисперсий подтверждена. Результаты моделирования приведены в таблицах 3–22.

Т а б л и ц а 3

Table 3

Результаты моделирования экспериментального МТА при $D_{w.d} = 0,343$

($\vartheta_m = 15$ км/ч, $L_1 = 0,2565$ м)

The results of simulating an experimental machine-tractor unit at $D_{w.d} = 0.343$ m

($\vartheta_m = 15$ km/h, $L_1 = 0.2565$ m)

| Наименование параметра / Name of the parameter | Значение параметров / The value of the parameters | | | | |
|--|--|-------|-------|-------|-------|
| Диаметр волнистого диска $D_{w.d}$, м / Diameter of the wave disk $D_{w.d}$, m | 0,343 | 0,343 | 0,343 | 0,343 | 0,343 |
| Количество волнистых дисков $k_{w.d}$, шт. / Number of wave discs $k_{w.d}$, pcs | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Количество лопаток на игольчатом диске k_{sb} , шт. / Number of blades per a needle disc, k_{sb} , pcs | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Производительность ТДК, га/ч / Performance of the turbo disc cultivator (W), ha/h | 3,720 | 3,86 | 4,04 | 4,17 | 4,26 |
| Количество лопаток на игольчатом диске k_{sb} , шт. / Number of blades per a needle disc, k_{sb} , pcs | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| Производительность ТДК, га/ч / Performance of the turbo disc cultivator (W), ha/h | 5,460 | 5,69 | 5,97 | 6,17 | 6,30 |
| Количество лопаток на игольчатом диске k_{sb} , шт. / Number of blades per a needle disc, k_{sb} , pcs | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| Производительность ТДК, га/ч / Performance of the turbo disc cultivator (W), ha/h | 7,20 | 7,52 | 7,89 | 8,16 | 8,34 |

Таблица 4

Table 4

Результаты моделирования экспериментального МТА при $D_{w.d} = 0,460$ м
($Q_m = 15$ км/ч, $L_1 = 0,2565$ м)
The results of simulating an experimental machine-tractor unit at $D_{w.d} = 0.460$ m
($Q_m = 15$ km/h, $L_1 = 0.2565$ m)

| Наименование параметра / Name of the parameter | Значение параметров / The value of the parameters | | | | |
|--|--|-------|-------|-------|-------|
| | 0,460 | 0,460 | 0,460 | 0,460 | 0,460 |
| Диаметр волнистого диска $D_{w.d}$, м / Diameter of the wave disk $D_{w.d}$, m | 0,460 | 0,460 | 0,460 | 0,460 | 0,460 |
| Количество волнистых дисков $k_{w.d}$, шт. / Number of wave discs $k_{w.d}$, pcs | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Количество лопаток на игольчатом диске k_{sb} , шт. / Number of blades per a needle disc, k_{sb} , pcs | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Производительность ТДК, га/ч / Performance of the turbo disc cultivator (W), ha/h | 3,80 | 3,92 | 4,11 | 4,24 | 4,32 |
| Количество лопаток на игольчатом диске k_{sb} , шт. / Number of blades per a needle disc, k_{sb} , pcs | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| Производительность ТДК, га/ч / Performance of the turbo disc cultivator (W), ha/h | 5,54 | 5,76 | 6,03 | 6,23 | 6,36 |
| Количество лопаток на игольчатом диске k_{sb} , шт. / Number of blades per a needle disc, k_{sb} , pcs | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| Производительность ТДК, га/ч / Performance of the turbo disc cultivator (W), ha/h | 7,28 | 7,59 | 7,96 | 8,23 | 8,40 |

Таблица 5

Table 5

Результаты моделирования экспериментального МТА при $D_{w.d} = 0,508$ м
($Q_m = 15$ км/ч, $L_1 = 0,2565$ м)
The results of simulating an experimental machine-tractor unit at $D_{w.d} = 0.508$ m
($Q_m = 15$ km/h, $L_1 = 0.2565$ m)

| Наименование параметра / Name of the parameter | Значение параметров / The value of the parameters | | | | |
|--|--|-------|-------|-------|-------|
| | 0,508 | 0,508 | 0,508 | 0,508 | 0,508 |
| Диаметр волнистого диска $D_{w.d}$, м / Diameter of the wave disk $D_{w.d}$, m | 0,508 | 0,508 | 0,508 | 0,508 | 0,508 |
| Количество волнистых дисков $k_{w.d}$, шт. / Number of wave discs $k_{w.d}$, pcs | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Количество лопаток на игольчатом диске k_{sb} , шт. / Number of blades per a needle disc, k_{sb} , pcs | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Производительность ТДК, га/ч / Performance of the turbo disc cultivator (W), ha/h | 3,84 | 3,95 | 4,13 | 4,26 | 4,34 |
| Количество лопаток на игольчатом диске k_{sb} , шт. / Number of blades per a needle disc, k_{sb} , pcs | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| Производительность ТДК, га/ч / Performance of the turbo disc cultivator (W), ha/h | 5,58 | 5,78 | 6,06 | 6,26 | 6,38 |
| Количество лопаток на игольчатом диске k_{sb} , шт. / Number of blades per a needle disc, k_{sb} , pcs | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| Производительность ТДК, га/ч / Performance of the turbo disc cultivator (W), ha/h | 7,32 | 7,62 | 7,98 | 8,25 | 8,43 |

Т а б л и ц а 6

Table 6

Результаты моделирования экспериментального МТА при $D_{w.d} = 0,545$ м
($Q_m = 15$ км/ч, $L_1 = 0,2565$ м)
The results of simulating an experimental machine-tractor unit at $D_{w.d} = 0.545$ m
($Q_m = 15$ km/h, $L_1 = 0.2565$ m)

| Наименование параметра / Name of the parameter | Значение параметров / The value of the parameters | | | | |
|--|--|-------|-------|-------|-------|
| Диаметр волнистого диска $D_{w.d}$, м / Diameter of the wave disk $D_{w.d}$, m | 0,545 | 0,545 | 0,545 | 0,545 | 0,545 |
| Количество волнистых дисков $k_{w.d}$, шт. / Number of wave discs $k_{w.d}$, pcs | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Количество лопаток на игольчатом диске k_{sb} , шт. / Number of blades per a needle disc, k_{sb} , pcs | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Производительность ТДК, га/ч / Performance of the turbo disc cultivator (W), ha/h | 3,86 | 3,97 | 4,15 | 4,28 | 4,36 |
| Количество лопаток на игольчатом диске k_{sb} , шт. / Number of blades per a needle disc, k_{sb} , pcs | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| Производительность ТДК, га/ч / Performance of the turbo disc cultivator (W), ha/h | 5,60 | 5,81 | 6,08 | 6,28 | 6,40 |
| Количество лопаток на игольчатом диске k_{sb} , шт. / Number of blades per a needle disc, k_{sb} , pcs | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| Производительность ТДК, га/ч / Performance of the turbo disc cultivator (W), ha/h | 7,34 | 7,64 | 8,00 | 8,27 | 8,44 |

Т а б л и ц а 7

Table 7

Результаты моделирования экспериментального МТА при $D_{w.d} = 0,559$ м
($Q_m = 15$ км/ч, $L_1 = 0,2565$ м)
The results of simulating an experimental machine-tractor unit at $D_{w.d} = 0.559$ m
($Q_m = 15$ km/h, $L_1 = 0.2565$ m)

| Наименование параметра / Name of the parameter | Значение параметров / The value of the parameters | | | | |
|--|--|-------|-------|-------|-------|
| Диаметр волнистого диска $D_{w.d}$, м / Diameter of the wave disk $D_{w.d}$, m | 0,559 | 0,559 | 0,559 | 0,559 | 0,559 |
| Количество волнистых дисков $k_{w.d}$, шт. / Number of wave discs $k_{w.d}$, pcs | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Количество лопаток на игольчатом диске k_{sb} , шт. / Number of blades per needle disc, k_{sb} , pcs | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Производительность ТДК, га/ч / Performance of the turbo disc cultivator (W), ha/h | 3,87 | 3,98 | 4,16 | 4,29 | 4,37 |
| Количество лопаток на игольчатом диске k_{sb} , шт. / Number of blades per a needle disc, k_{sb} , pcs | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| Производительность ТДК, га/ч / Performance of the turbo disc cultivator (W), ha/h | 5,61 | 5,81 | 6,09 | 6,28 | 6,41 |
| Количество лопаток на игольчатом диске k_{sb} , шт. / Number of blades per a needle disc, k_{sb} , pcs | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| Производительность ТДК, га/ч / Performance of the turbo disc cultivator (W), ha/h | 7,35 | 7,65 | 8,01 | 8,28 | 8,45 |

Таблица 8

Table 8

Результаты моделирования экспериментального МТА при $D_{w.d} = 0,343$ м
при ($\vartheta_m = 15$ км/ч, $L_1 = 0,3195$ м)
The results of simulating an experimental machine-tractor unit at $D_{w.d} = 0.343$ m
($\vartheta_m = 15$ km/h, $L_1 = 0.3195$ m)

| Наименование параметра / Name of the parameter | Значение параметров / The value of the parameters | | | | |
|--|--|-------|-------|-------|-------|
| Диаметр волнистого диска $D_{w.d}$, м / Diameter of the wave disk $D_{w.d}$, m | 0,343 | 0,343 | 0,343 | 0,343 | 0,343 |
| Количество волнистых дисков $k_{w.d}$, шт. / Number of the wave discs $k_{w.d}$, pcs | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Количество лопаток на игольчатом диске k_{sb} , шт. / Number of blades per a needle disc, k_{sb} , pcs | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Производительность ТДК, га/ч / Performance of the turbo disc cultivator (W), ha/h | 4,58 | 4,76 | 4,99 | 5,15 | 5,26 |
| Количество лопаток на игольчатом диске k_{sb} , шт. / Number of blades per a needle disc, k_{sb} , pcs | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| Производительность ТДК, га/ч / Performance of the turbo disc cultivator (W), ha/h | 6,74 | 7,04 | 7,39 | 7,64 | 7,80 |
| Количество лопаток на игольчатом диске k_{sb} , шт. / Number of blades per a needle disc, k_{sb} , pcs | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| Производительность ТДК, га/ч / Performance of the turbo disc cultivator (W), ha/h | 8,91 | 9,32 | 9,78 | 10,12 | 10,35 |

Таблица 9

Table 9

Результаты моделирования экспериментального МТА при $D_{w.d} = 0,460$ м
при ($\vartheta_m = 15$ км/ч, $L_1 = 0,3195$ м)
The results of simulating an experimental machine-tractor unit at $D_{w.d} = 0.460$ m
($\vartheta_m = 15$ km/h, $L_1 = 0.3195$ m)

| Наименование параметра / Name of the parameter | Значение параметров / The value of the parameters | | | | |
|--|--|-------|-------|-------|-------|
| Диаметр волнистого диска $D_{w.d}$, м / Diameter of the wave disk $D_{w.d}$, m | 0,460 | 0,460 | 0,460 | 0,460 | 0,460 |
| Количество волнистых дисков $k_{w.d}$, шт. / Number of the wave discs $k_{w.d}$, pcs | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Количество лопаток на игольчатом диске k_{sb} , шт. / Number of blades per a needle disc, k_{sb} , pcs | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Производительность ТДК, га/ч / Performance of the turbo disc cultivator (W), ha/h | 4,66 | 4,83 | 5,05 | 5,22 | 5,32 |
| Количество лопаток на игольчатом диске k_{sb} , шт. / Number of blades per a needle disc, k_{sb} , pcs | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| Производительность ТДК, га/ч / Performance of the turbo disc cultivator (W), ha/h | 6,82 | 7,11 | 7,45 | 7,70 | 7,86 |
| Количество лопаток на игольчатом диске k_{sb} , шт. / Number of blades per a needle disc, k_{sb} , pcs | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| Производительность ТДК, га/ч / Performance of the turbo disc cultivator (W), ha/h | 8,99 | 9,39 | 9,85 | 10,19 | 10,41 |

**Результаты моделирования экспериментального МТА при $D_{w.d} = 0,508$ м
при ($\vartheta_m = 15$ км/ч, $L_1 = 0,3195$ м)**
**The results of simulating of an experimental machine-tractor unit at $D_{w.d} = 0.508$ m
($\vartheta_m = 15$ km/h, $L_1 = 0.3195$ m)**

| Наименование параметра / Name of the parameter | Значение параметров / The value of the parameters | | | | |
|--|--|-------|-------|-------|-------|
| Диаметр волнистого диска $D_{w.d}$, м / Diameter of the wave disk $D_{w.d}$, m | 0,508 | 0,508 | 0,508 | 0,508 | 0,508 |
| Количество волнистых дисков $k_{w.d}$, шт. / Number of the wave discs $k_{w.d}$, pcs | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Количество лопаток на игольчатом диске k_{sb} , шт. / Number of blades per a needle disc k_{sb} , pcs | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Производительность ТДК, га/ч / Performance of the turbo disc cultivator (W), ha/h | 4,69 | 4,85 | 5,08 | 5,24 | 5,35 |
| Количество лопаток на игольчатом диске k_{sb} , шт. / Number of blades per a needle disc k_{sb} , pcs | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| Производительность ТДК, га/ч / Performance of the turbo disc cultivator (W), ha/h | 6,86 | 7,13 | 7,48 | 7,73 | 7,89 |
| Количество лопаток на игольчатом диске k_{sb} , шт. / Number of blades per a needle disc, k_{sb} , pcs | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| Производительность ТДК, га/ч / Performance of the turbo disc cultivator (W), ha/h | 9,03 | 9,42 | 9,88 | 10,21 | 10,43 |

**Результаты моделирования экспериментального МТА при $D_{w.d} = 0,545$ м
при ($\vartheta_m = 15$ км/ч, $L_1 = 0,3195$ м)**
**The results of simulating an experimental machine-tractor unit at $D_{w.d} = 0.545$ m
($\vartheta_m = 15$ km/h, $L_1 = 0.3195$ m)**

| Наименование параметра / Name of the parameter | Значение параметров / The value of the parameters | | | | |
|--|--|-------|-------|-------|-------|
| Диаметр волнистого диска $D_{w.d}$, м / Diameter of the wave disk $D_{w.d}$, m | 0,545 | 0,545 | 0,545 | 0,545 | 0,545 |
| Количество волнистых дисков $k_{w.d}$, шт. / Number of the wave discs $k_{w.d}$, pcs | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Количество лопаток на игольчатом диске k_{sb} , шт. / Number of blades per a needle disc, k_{sb} , pcs | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Производительность ТДК, га/ч / Performance of the turbo disc cultivator (W), ha/h | 4,72 | 4,87 | 5,10 | 5,26 | 5,36 |
| Количество лопаток на игольчатом диске k_{sb} , шт. / Number of blades per a needle disc, k_{sb} , pcs | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| Производительность ТДК, га/ч / Performance of the turbo disc cultivator (W), ha/h | 6,88 | 7,16 | 7,50 | 7,75 | 7,91 |
| Количество лопаток на игольчатом диске k_{sb} , шт. / Number of blades per a needle disc, k_{sb} , pcs | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| Производительность ТДК, га/ч / Performance of the turbo disc cultivator (W), ha/h | 9,05 | 9,44 | 9,90 | 10,23 | 10,45 |

Таблица 12
 Table 12

Результаты моделирования экспериментального МТА при $D_{w.d} = 0,559$ м
при ($\vartheta_m = 15$ км/ч, $L_1 = 0,3195$ м)
The results of simulating an experimental machine-tractor unit at $D_{w.d} = 0.559$ m
($\vartheta_m = 15$ km/h, $L_1 = 0.3195$ m)

| Наименование параметра / Name of the parameter | Значение параметров / The value of the parameters | | | | |
|--|--|-------|-------|-------|-------|
| Диаметр волнистого диска $D_{w.d}$, м / Diameter of the wave disk $D_{w.d}$, m | 0,559 | 0,559 | 0,559 | 0,559 | 0,559 |
| Количество волнистых дисков $k_{w.d}$, шт. / Number of the wave discs $k_{w.d}$, pcs | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Количество лопаток на игольчатом диске k_{sb} , шт. / Number of blades per a needle disc, k_{sb} , pcs | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Производительность ТДК, га/ч / Performance of the turbo disc cultivator (W), ha/h | 4,73 | 4,88 | 5,11 | 5,27 | 5,37 |
| Количество лопаток на игольчатом диске k_{sb} , шт. / Number of blades per a needle disc, k_{sb} , pcs | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| Производительность ТДК, га/ч / Performance of the turbo disc cultivator (W), ha/h | 6,89 | 7,16 | 7,51 | 7,75 | 7,91 |
| Количество лопаток на игольчатом диске k_{sb} , шт. / Number of blades per a needle disc, k_{sb} , pcs | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| Производительность ТДК, га/ч / Performance of the turbo disc cultivator (W), ha/h | 9,06 | 9,45 | 9,90 | 10,24 | 10,46 |

 Таблица 13
 Table 13

Результаты моделирования экспериментального МТА при $D_{w.d} = 0,343$ м
при ($\vartheta_m = 18$ км/ч, $L_1 = 0,2565$ м)
The results of simulating an experimental machine-tractor unit at $D_{w.d} = 0.343$ m
($\vartheta_m = 18$ km/h, $L_1 = 0.2565$ m)

| Наименование параметра / Name of the parameter | Значение параметров / The value of the parameters | | | | |
|--|--|-------|-------|-------|-------|
| Диаметр волнистого диска $D_{w.d}$, м / Diameter of the wave disk $D_{w.d}$, m | 0,343 | 0,343 | 0,343 | 0,343 | 0,343 |
| Количество волнистых дисков $k_{w.d}$, шт. / Number of wave discs $k_{w.d}$, pcs | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Количество лопаток на игольчатом диске k_{sb} , шт. / Number of blades per a needle disc, k_{sb} , pcs | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Производительность ТДК, га/ч / Performance of the turbo disc cultivator (W), ha/h | 4,46 | 4,63 | 4,85 | 5,01 | 5,11 |
| Количество лопаток на игольчатом диске k_{sb} , шт. / Number of blades per a needle disc, k_{sb} , pcs | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| Производительность ТДК, га/ч / Performance of the turbo disc cultivator (W), ha/h | 6,55 | 6,83 | 7,16 | 7,40 | 7,56 |
| Количество лопаток на игольчатом диске k_{sb} , шт. / Number of blades per a needle disc, k_{sb} , pcs | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| Производительность ТДК, га/ч / Performance of the turbo disc cultivator (W), ha/h | 8,64 | 9,03 | 9,47 | 9,80 | 10,01 |

Т а б л и ц а 14

T a b l e 14

**Результаты моделирования экспериментального МТА при $D_{w.d} = 0,460$ м
при ($\vartheta_m = 18$ км/ч, $L_1 = 0,2565$ м)**
**The results of simulating an experimental machine-tractor unit at $D_{w.d} = 0.460$ m
($\vartheta_m = 18$ km/h, $L_1 = 0.2565$ m)**

| Наименование параметра / Name of the parameter | Значение параметров / The value of the parameters | | | | |
|--|--|-------|-------|-------|-------|
| Диаметр волнистого диска $D_{w.d}$, м / Diameter of the wave disk $D_{w.d}$, m | 0,460 | 0,460 | 0,460 | 0,460 | 0,460 |
| Количество волнистых дисков $k_{w.d}$, шт. / Number of wave discs $k_{w.d}$, pcs | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Количество лопаток на игольчатом диске k_{sb} , шт. / Number of blades per a needle disc, k_{sb} , pcs | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Производительность ТДК, га/ч / Performance of the turbo disc cultivator (W), ha/h | 4,56 | 4,71 | 4,93 | 5,08 | 5,18 |
| Количество лопаток на игольчатом диске k_{sb} , шт. / Number of blades per a needle disc, k_{sb} , pcs | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| Производительность ТДК, га/ч / Performance of the turbo disc cultivator (W), ha/h | 6,65 | 6,91 | 7,24 | 7,48 | 7,63 |
| Количество лопаток на игольчатом диске k_{sb} , шт. / Number of blades per a needle disc, k_{sb} , pcs | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| Производительность ТДК, га/ч / Performance of the turbo disc cultivator (W), ha/h | 8,74 | 9,11 | 9,55 | 9,87 | 10,08 |

Т а б л и ц а 15

T a b l e 15

**Результаты моделирования экспериментального МТА при $D_{w.d} = 0,508$ м
при ($\vartheta_m = 18$ км/ч, $L_1 = 0,2565$ м)**
**The results of simulating f an experimental machine-tractor unit at $D_{w.d} = 0.508$ m
($\vartheta_m = 18$ km/h, $L_1 = 0.2565$ m)**

| Наименование параметра / Name of the parameter | Значение параметров / The value of the parameters | | | | |
|--|--|-------|-------|-------|-------|
| Диаметр волнистого диска $D_{w.d}$, м / Diameter of the wave disk $D_{w.d}$, m | 0,508 | 0,508 | 0,508 | 0,508 | 0,508 |
| Количество волнистых дисков $k_{w.d}$, шт. / Number of wave discs $k_{w.d}$, pcs | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Количество лопаток на игольчатом диске k_{sb} , шт. / Number of blades per a needle disc, k_{sb} , pcs | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Производительность ТДК, га/ч / Performance of the turbo disc cultivator (W), ha/h | 4,60 | 4,74 | 4,96 | 5,11 | 5,21 |
| Количество лопаток на игольчатом диске k_{sb} , шт. / Number of blades per a needle disc, k_{sb} , pcs | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| Производительность ТДК, га/ч / Performance of the turbo disc cultivator (W), ha/h | 6,69 | 6,94 | 7,27 | 7,51 | 7,66 |
| Количество лопаток на игольчатом диске k_{sb} , шт. / Number of blades per a needle disc, k_{sb} , pcs | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| Производительность ТДК, га/ч / Performance of the turbo disc cultivator (W), ha/h | 8,78 | 9,14 | 9,58 | 9,90 | 10,11 |

Таблица 16

Table 16

**Результаты моделирования экспериментального МТА при $D_{w.d} = 0,545$ м
 при ($\vartheta_m = 18$ км/ч, $L_1 = 0,2565$ м)**
**The results of simulating an experimental machine-tractor unit at $D_{w.d} = 0.545$ m
 ($\vartheta_m = 18$ km/h, $L_1 = 0.2565$ m)**

| Наименование параметра / Name of the parameter | Значение параметров / The value of the parameters | | | | |
|--|--|-------|-------|-------|-------|
| Диаметр волнистого диска $D_{w.d}$, м / Diameter of the wave disk $D_{w.d}$, m | 0,545 | 0,545 | 0,545 | 0,545 | 0,545 |
| Количество волнистых дисков $k_{w.d}$, шт. / Number of wave discs $k_{w.d}$, pcs | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Количество лопаток на игольчатом диске k_{sb} , шт. / Number of blades per a needle disc, k_{sb} , pcs | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Производительность ТДК, га/ч / Performance of the turbo disc cultivator (W), ha/h | 4,64 | 4,77 | 4,98 | 5,14 | 5,23 |
| Количество лопаток на игольчатом диске k_{sb} , шт. / Number of blades per a needle disc, k_{sb} , pcs | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| Производительность ТДК, га/ч / Performance of the turbo disc cultivator (W), ha/h | 6,72 | 6,97 | 7,29 | 7,53 | 7,68 |
| Количество лопаток на игольчатом диске k_{sb} , шт. / Number of blades per a needle disc, k_{sb} , pcs | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| Производительность ТДК, га/ч / Performance of the turbo disc cultivator (W), ha/h | 8,81 | 9,17 | 9,61 | 9,93 | 10,13 |

Таблица 17

Table 17

**Результаты моделирования экспериментального МТА при $D_{w.d} = 0,559$ м
 при ($\vartheta_m = 18$ км/ч, $L_1 = 0,2565$ м)**
**The results of simulating an experimental machine-tractor unit at $D_{w.d} = 0.559$ m
 ($\vartheta_m = 18$ km/h, $L_1 = 0.2565$ m)**

| Наименование параметра / Name of the parameter | Значение параметров / The value of the parameters | | | | |
|--|--|-------|-------|-------|-------|
| Диаметр волнистого диска $D_{w.d}$, м / Diameter of the wave disk $D_{w.d}$, m | 0,559 | 0,559 | 0,559 | 0,559 | 0,559 |
| Количество волнистых дисков $k_{w.d}$, шт. / Number of wave discs $k_{w.d}$, pcs | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Количество лопаток на игольчатом диске k_{sb} , шт. / Number of blades per a needle disc, k_{sb} , pcs | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Производительность ТДК, га/ч / Performance of the turbo disc cultivator (W), ha/h | 4,65 | 4,78 | 4,99 | 5,15 | 5,24 |
| Количество лопаток на игольчатом диске k_{sb} , шт. / Number of blades per a needle disc, k_{sb} , pcs | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| Производительность ТДК, га/ч / Performance of the turbo disc cultivator (W), ha/h | 6,73 | 6,98 | 7,30 | 7,54 | 7,69 |
| Количество лопаток на игольчатом диске k_{sb} , шт. / Number of blades per a needle disc, k_{sb} , pcs | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| Производительность ТДК, га/ч / Performance of the turbo disc cultivator (W), ha/h | 8,82 | 9,17 | 9,61 | 9,93 | 10,14 |

**Результаты моделирования экспериментального МТА при $D_{w.d} = 0,343$ м
при ($\vartheta_m = 18$ км/ч, $L_1 = 0,3195$ м)**
**The results of simulating an experimental machine-tractor unit at $D_{w.d} = 0.343$ m
($\vartheta_m = 18$ km/h, $L_1 = 0.3195$ m)**

| Наименование параметра / Name of the parameter | Значение параметров / The value of the parameters | | | | |
|--|--|-------|-------|-------|-------|
| Диаметр волнистого диска $D_{w.d}$, м / Diameter of the wave disk $D_{w.d}$, m | 0,343 | 0,343 | 0,343 | 0,343 | 0,343 |
| Количество волнистых дисков $k_{w.d}$, шт. / Number of wave discs $k_{w.d}$, pcs | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Количество лопаток на игольчатом диске k_{sb} , шт. / Number of blades per a needle disc, k_{sb} , pcs | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Производительность ТДК, га/ч / Performance of the turbo disc cultivator (W), ha/h | 5,49 | 5,71 | 5,98 | 6,18 | 6,31 |
| Количество лопаток на игольчатом диске k_{sb} , шт. / Number of blades per a needle disc, k_{sb} , pcs | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| Производительность ТДК, га/ч / Performance of the turbo disc cultivator (W), ha/h | 8,09 | 8,45 | 8,86 | 9,17 | 9,36 |
| Количество лопаток на игольчатом диске k_{sb} , шт. / Number of blades per a needle disc, k_{sb} , pcs | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| Производительность ТДК, га/ч / Performance of the turbo disc cultivator (W), ha/h | 10,69 | 11,19 | 11,74 | 12,15 | 12,42 |

**Результаты моделирования экспериментального МТА при $D_{w.d} = 0,460$ м
при ($\vartheta_m = 18$ км/ч, $L_1 = 0,3195$ м)**
**The results of simulating an experimental machine-tractor unit at $D_{w.d} = 0.460$ m
($\vartheta_m = 18$ km/h, $L_1 = 0.3195$ m)**

| Наименование параметра / Name of the parameter | Значение параметров / The value of the parameters | | | | |
|--|--|-------|-------|-------|-------|
| Диаметр волнистого диска $D_{w.d}$, м / Diameter of the wave disk $D_{w.d}$, m | 0,460 | 0,460 | 0,460 | 0,460 | 0,460 |
| Количество волнистых дисков $k_{w.d}$, шт. / Number of wave discs $k_{w.d}$, pcs | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Количество лопаток на игольчатом диске k_{sb} , шт. / Number of blades per a needle disc, k_{sb} , pcs | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Производительность ТДК, га/ч / Performance of the turbo disc cultivator (W), ha/h | 5,59 | 5,79 | 6,06 | 6,26 | 6,39 |
| Количество лопаток на игольчатом диске k_{sb} , шт. / Number of blades per a needle disc, k_{sb} , pcs | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| Производительность ТДК, га/ч / Performance of the turbo disc cultivator (W), ha/h | 8,19 | 8,53 | 8,94 | 9,24 | 9,44 |
| Количество лопаток на игольчатом диске k_{sb} , шт. / Number of blades per a needle disc, k_{sb} , pcs | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| Производительность ТДК, га/ч / Performance of the turbo disc cultivator (W), ha/h | 10,79 | 11,27 | 11,82 | 12,22 | 12,49 |

Таблица 20

Table 20

Результаты моделирования экспериментального МТА при $D_{w.d} = 0,508$ м
при $(\vartheta_m = 18$ км/ч, $L_1 = 0,3195$ м)
The results of simulating an experimental machine-tractor unit at $D_{w.d} = 0.508$ m
 $(\vartheta_m = 18$ km/h, $L_1 = 0.3195$ m)

| Наименование параметра / Name of the parameter | Значение параметров / The value of the parameters | | | | |
|--|--|-------|-------|-------|-------|
| Диаметр волнистого диска $D_{w.d}$, м / Diameter of the wave disk $D_{w.d}$, m | 0,508 | 0,508 | 0,508 | 0,508 | 0,508 |
| Количество волнистых дисков $k_{w.d}$, шт. / Number of wave discs $k_{w.d}$, pcs | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Количество лопаток на игольчатом диске k_{sb} , шт. / Number of blades per a needle disc, k_{sb} , pcs | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Производительность ТДК, га/ч / Performance of the turbo disc cultivator (W), ha/h | 5,63 | 5,82 | 6,09 | 6,29 | 6,41 |
| Количество лопаток на игольчатом диске k_{sb} , шт. / Number of blades per a needle disc, k_{sb} , pcs | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| Производительность ТДК, га/ч / Performance of the turbo disc cultivator (W), ha/h | 8,23 | 8,56 | 8,97 | 9,27 | 9,47 |
| Количество лопаток на игольчатом диске k_{sb} , шт. / Number of blades per a needle disc, k_{sb} , pcs | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| Производительность ТДК, га/ч / Performance of the turbo disc cultivator (W), ha/h | 10,83 | 11,30 | 11,85 | 12,25 | 12,52 |

Таблица 21

Table 21

Результаты моделирования экспериментального МТА
при $D_{w.d} = 0,545$ м при $(\vartheta_m = 18$ км/ч, $L_1 = 0,3195$ м)
The results of simulating an experimental machine-tractor unit at $D_{w.d} = 0.545$ m
 $(\vartheta_m = 18$ km/h, $L_1 = 0.3195$ m)

| Наименование параметра / Name of the parameter | Значение параметров / The value of the parameters | | | | |
|--|--|-------|-------|-------|-------|
| Диаметр волнистого диска $D_{w.d}$, м / Diameter of the wave disk $D_{w.d}$, m | 0,545 | 0,545 | 0,545 | 0,545 | 0,545 |
| Количество волнистых дисков $k_{w.d}$, шт. / Number of wave discs $k_{w.d}$, pcs | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Количество лопаток на игольчатом диске k_{sb} , шт. / Number of blades per a needle disc, k_{sb} , pcs | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Производительность ТДК, га/ч / Performance of the turbo disc cultivator (W), ha/h | 5,66 | 5,85 | 6,12 | 6,31 | 6,44 |
| Количество лопаток на игольчатом диске k_{sb} , шт. / Number of blades per a needle disc, k_{sb} , pcs | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| Производительность ТДК, га/ч / Performance of the turbo disc cultivator (W), ha/h | 8,26 | 8,59 | 9,00 | 9,30 | 9,49 |
| Количество лопаток на игольчатом диске k_{sb} , шт. / Number of blades per a needle disc, k_{sb} , pcs | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| Производительность ТДК, га/ч / Performance of the turbo disc cultivator (W), ha/h | 10,86 | 11,33 | 11,87 | 12,28 | 12,54 |

**Результаты моделирования экспериментального МТА при $D_{w.d} = 0,559$ м
при ($\vartheta_m = 18$ км/ч, $L_1 = 0,3195$ м)**
**The results of simulating an experimental machine-tractor unit at $D_{w.d} = 0.559$ m
($\vartheta_m = 18$ km/h, $L_1 = 0.3195$ m)**

| Наименование параметра / Name of the parameter | Значение параметров / The value of the parameters | | | | |
|--|--|-------|-------|-------|-------|
| | 0,559 | 0,559 | 0,559 | 0,559 | 0,559 |
| Диаметр волнистого диска $D_{w.d}$, м / Diameter of the wave disk $D_{w.d}$, m | 0,559 | 0,559 | 0,559 | 0,559 | 0,559 |
| Количество волнистых дисков $k_{w.d}$, шт. / Number of wave discs $k_{w.d}$, pcs | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Количество лопаток на игольчатом диске k_{sb} , шт. / Number of blades per needle disc, k_{sb} , pcs | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Производительность ТДК, га/ч / Performance of the turbo disc cultivator (W), ha/h | 5,67 | 5,86 | 6,13 | 6,32 | 6,45 |
| Количество лопаток на игольчатом диске k_{sb} , шт. / Number of blades per a needle disc, k_{sb} , pcs | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| Производительность ТДК, га/ч / Performance of the turbo disc cultivator (W), ha/h | 8,27 | 8,60 | 9,01 | 9,30 | 9,50 |
| Количество лопаток на игольчатом диске k_{sb} , шт. / Number of blades per a needle disc, k_{sb} , pcs | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| Производительность ТДК, га/ч / Performance of the turbo disc cultivator (W), ha/h | 10,87 | 11,34 | 11,88 | 12,29 | 12,55 |

При скорости движения 15 км/ч и длине иглы с лопаткой $L_1 = 0,2565$ м производительность ТДК повышается. Увеличение количества лопаток приводит к росту производительности с 3,72 до 8,34 га/ч (в 2,242 раз). При росте диаметра волнистого диска $D_{w.d} = 0,343-0,559$ м и количества лопаток ($k_{sb} = 4-8$ шт.) производительность практически остается неизменной (3,72–8,45 га/ч).

В целом производительность повышается с 4,58 до 10,46 га/ч с ростом количества лопаток на игольчатом диске. При увеличении иглы с лопаткой с 0,2565 до 0,3195 м и скорости движения агрегата 15 км/ч $W = 3,72-10,46$ га/ч, т. е. ТДК становится производительнее в 2,812 раза.

Развитие скорости движения агрегата до 18 км/ч и изменение диаметра волнистого диска с 0,343 до 0,559 м при длине лопатки 0,2565 м повышает производительность с 4,46 до 10,14 га/ч, т. е. в 2,274 раз. При той же скорости движения и длине лопатки 0,3195 м производительность ТДК увеличивается с 5,49 до 12,55 га/ч (в 2,286 раз) при росте диаметра волнистого диска. При этом, если длина иглы с лопаткой $L_1 = 0,2565-0,3195$ м производительность повышается с 4,46 до 12,55 га/ч, т. е. в 2,814 раз.

Таким образом, увеличение скорости движения агрегата с 15 до 18 км/ч и длины иглы с лопаткой приводит к повышению производительности с 3,72 до 12,55 га/ч, т. е. в 3,374 раз (таблицы 3–12).

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного моделирования процесса ВОП путем варьирования скорости движения машинно-тракторного агрегата, который состоит из разработанного турбодискового культиватора и энергетического средства, длины

иглы с лопаткой, диаметра волнистого диска, производительность ТДК повысилась с 3,72 до 12,55 га/ч, что также возможно при увеличении количества волнистых дисков и лопаток на игольчатом диске. Сопоставив эти данные со средними значениями производительности, выведенными в других исследованиях, выявлено расхождение на 6,8 % [27]. Так, при движении агромашины со скоростью 15 км/ч и длине игл 0,257–0,320 м производительность составляет: при 4 лопатках – 3,72–5,37 га/ч; при 6 лопатках – 5,46–7,91 га/ч; при 8 лопатках – 7,20–10,46 га/ч. При дальнейшем увеличении скорости до 18 км/ч производительность увеличивается: с 4,46 до 6,45 га/ч с 4 лопатками; с 6,55 до 9,50 га/ч с 6 лопатками; с 8,64 до 12,55 га/ч с 8 лопатками.

Предложенная блок-схема алгоритма позволяет оптимизировать производительность турбодискового культиватора в зависимости от конструктивных параметров дисковых рабочих органов, эксплуатационных его показателей.

К ограничениям исследования можно отнести недостаточную информационную оснащенность о конструкциях ТДК для ВОП, а также о конструктивных параметрах их рабочих органов, что затрудняет оценку производительности. Вследствие этого необходимо проводить сравнение с культиваторами для мелкой и поверхностной обработки почвы.

Практической значимостью исследования является теоретическое обоснование рациональной производительности турбодискового культиватора для вертикальной обработки почвы, а также блок-схема алгоритма, которая позволяет выбрать оптимальную производительность турбодискового культиватора при различных режимных показателях и конструктивных параметрах рабочих органов.

Перспективой исследования является разработка и поиск новых технических решений для модернизации конструкций рабочих органов ТДК с целью повышения его производительности при снижении энергоемкости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Припоров И.Е., Курасов В.С., Бацунов В.И. Анализ технических характеристик турбодисковых культиваторов для вертикальной обработки почвы. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2025;(2):100–105. URL: <https://orensau.ru/ru/nauka/izvestiya-orenburgskogo-gau> (дата обращения: 14.04.2025).
2. Редеев Г.В., Щетинина С.Н. К вопросу об исследовании технических характеристик почвообрабатывающих агрегатов. *Вестник Омского ГАУ*. 2012;(1):71–74. <https://elibrary.ru/synqhb>
3. Припоров И.Е., Курасов В.С., Бацунов В.И. Кинематика игольчатого диска с лопатками в турбодисковом культиваторе при измельчении растительных остатков. *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*. 2024;(3):215–222. URL: <https://vestnik.ulsau.ru/1123> (дата обращения: 19.04.2025).
4. Борисенко И.Б., Скрипкин Д.В., Мезникова М.В., Тимошенко В.В., Элбакян А.Ж. Катковый измельчитель пожнивных остатков высокостебельных сельскохозяйственных культур. *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование*. 2022;(2):329–339. URL: <https://www.volgau.com/izvestiya> (дата обращения: 22.04.2025).
5. Козлов Н.С. Обзор и анализ конструкций рабочих органов почвообрабатывающих агрегатов для измельчения растительных остатков. *Вестник Белорусской ГСХА*. 2017;(1):123–125. URL: <https://baa.by/vestnik/> (дата обращения: 24.04.2025).

6. Zeng Z., Chen Y. Performance Evaluation of Futed Coulters and Rippled Discs for Vertical Tillage. *Soil and Tillage Research*. 2018;(183):93–99. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.06.003>
7. Соболевский И.В. Бионическое обоснование конструкции почвообрабатывающих рабочих органов дисковой бороны. *Известия сельскохозяйственной науки Тавриды*. 2019;(19):73–84. <https://www.elibrary.ru/aizmod>
8. Chirende B., Li J., Wen LG., Simalenga T. Effects of Bionic Non-Smooth Surface on Reducing Soil Resistance to Disc Ploughing. *Science China Technological Sciences*. 2010;(53):2960–2965. <https://doi.org/10.1007/s11431-010-4128-8>
9. Zhilyakov A.L., Kozlov V.G., Skuryatin N.F., Bulygin N.N., Brovchenko A.D., Shwarz A.A. Mathematical Prerequisites for Improving the Method of Sowing Crops on Sloping Lands. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Zernograd: IOP Publishing Ltd; 2021. Article no. 012075. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/659/1/012075>
10. Gao Y., Shen X., Li X., Meng Z., Sun J., Duan A. Effects of pre-Sowing Irrigation on Crop Water Consumption, Grain Yield and Water Productivity of Winter Wheat in the North China Plain. *Irrigation and Drainage*. 2015;64(4):566–574. <https://doi.org/10.1002/ird.1927>
11. Абдусаламова Р.Р., Баламирзоева З.М. Методы защиты почвы от водной и ветровой эрозии. *Вестник Социально-педагогического института*. 2021;(4):30–40. URL: <https://spi-vuz.ru/vestnik-spi.html> (дата обращения: 24.04.2025).
12. Polushkin O.A., Ignatenko V.I., Ignatenko I.V., Vyalikov I.L., Bogdanovich V.P. Dynamic Models of Cultivator Spring Tine Performance. In: MATEC Web of Conferences. Rostov-on-Don: EDP Sciences; 2018. Article no. 01016. <https://www.elibrary.ru/jycdhw>
13. Bulgakov V., Kaletnik H., Goncharuk T. Research of the Movement of Agricultural Aggregates Using the Methods of the Movement Stability Theory. *Agronomy Research*. 2019;17(5):1846–1860. <https://doi.org/10.15159/AR.19.189>
14. Dahab M.H., Kheiry A.N.O., Numan M.H. Developed and Field Performance Evaluation of a Combined Cultivator. *Journal of Agronomy Research*. 2021;4(2):12–19. <https://doi.org/10.14302/issn.2639-3166.jar-21-3872>
15. Ju., Rantung R., Kalesaran L. Kajian Penggunaan Cultivator Tipe Motoyama MTE 70NL Untuk Pengolahan Tanah Di Lahan Kelompok Tani Syalom DESA Pinasungkulan Kecamatan Modinding. *COCOS*. 2023;15(2). <https://doi.org/10.35791/cocos.v15i2.47195>
16. Kumar A.A., Anil Kumar C., Chakrapani V., Rajesh D., Seshagiri Rao N. Development and Evaluation of Multifunctional Tillage Implement. *Current Journal of Applied Science and Technology*. 2022;41(30):46–56. <https://doi.org/10.9734/cjast/2022/v41i3031807>
17. Veselovska N.R., Shargorodskiy S.A., Burlaka S.A. Mathematical Modeling of the Interaction of the Arrow Leg of the Cultivator with the Soil. *Vibrations in Engineering and Technology*. 2023;(1):57–62. <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2023-1-6>
18. Wang M., Fu Z., Zheng Zh., Huang Y., Wei W. Effect of Performance of Soil Cultivator with Different Surface Textures of Shovel Wing. *Agriculture*. 2021;(11):1039. <https://doi.org/10.3390/agriculture11111039>
19. Baek S.-Yu., Kim W.-S., Baek S.-M., Jeon H.-H., Lee J.-H., Lee D.-H. и др. Performance Simulation of an Electric Multipurpose Cultivator According to Rotary Tillage. *Korean Journal of Agricultural Science*. 2021;48(4):1027–1037. <https://doi.org/10.7744/kjoas.20210087>
20. Сыромятников Ю.Н. Исследование процесса работы экспериментального культиватора для сплошной обработки почвы. *Аэкономика: экономика и сельское хозяйство*. 2018;(4):4. <https://elibrary.ru/rraibt>
21. Lee S.-H., Kim T.-H., Shin So.-Y., Jang S.-H., Choi S.-R. Vibration Characteristics and Performance Analysis of Knapsack Type Weeding Cultivator According to Shape and Width of Blade. *Journal of Agriculture & Life Science*. 2021;55(6):83–90. <https://doi.org/10.14397/jals.2021.55.6.83>
22. Валиев А.Р. Исследование качественных показателей работы культиватора с парнодисковыми рабочими органами. *Техника и оборудование для села*. 2017;(4):24–29. <https://elibrary.ru/yqgaud>

23. Валиев А.Р. Исследование процесса движения почвы по рабочей поверхности дискового культиватора. *Вестник Казанского ГАУ*. 2017;12(3):54–60. https://doi.org/10.12737/article_5a1d9587a0d852.23012684
24. Behera A., Raheman H., Thomas E.V. Comparative Study on Tillage Performance of Rota-Cultivator (a Passive – Active Combination Tillage Implement) with Rotavator (an Active Tillage Implement). *Soil & Tillage Research*. 2021;207. Article no. 104861. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104861>
25. Hosseini H., Farzad A., Majeed F. Multi-Objective Optimal Design and Development of a Four-Bar Mechanism for Weed Control. *Machines*. 2022;10(3):198. <https://doi.org/10.3390/machines10030198>
26. Припоров И.Е., Курасов В.С., Бацунов В.И. Разрушение стерни подсолнечника лопатками игольчатого диска инновационного турбодискового культиватора. *Инженерные технологии и системы*. 2025;35(4):750–769. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202504.750-769>
27. Кузычченко Ю.А. Технологический показатель работы культиваторов в зоне Предкавказья. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2024;(2):94–97. <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2024-106-2-94-97>

REFERENCES

1. Priporov I.E., Kurasov V.S., Batsunov V.I. Analysis of Technical Characteristics of Turbo-Disc Cultivators for Vertical Tillage. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2025;(2):100–105. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://orensau.ru/ru/nauka/izvestiya-orenburgskogo-gau> (accessed 14.04.2025).
2. Redreev G.V., Shhetinina S.N. On the Question of Technical Characteristics of the Study Soil Cultivating Units. *Vestnik of Omsk SAU*. 2012;(1):71–74. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/synqhb>
3. Priporov I.E., Kurasov V.S., Batsunov V.I. Kinematics of a Needle Disk with Blades in a Turbo-Disc Cultivator When Crushing Plant Residues. *Vestnik of Ulyanovsk State Agricultural Academy*. 2024;(3):215–222. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://vestnik.ulsau.ru/1123> (accessed 19.04.2025).
4. Borisenko I.B., Skripkin D.V., Meznikova M.V. Timoshenko V.V., Elbakyan A.J. Roller Shredder for Stubble Residues of High-Stemmed Crops. *Proceedings of Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Education*. 2022;(2):329–339. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://www.volgau.com/izvestiya> (accessed 22.04.2025).
5. Kozlov N.S. [Review and Analysis of Structures of Working Bodies of Tillage Units for Crushing Plant Residues]. *Bulletin of the Belarusian State Agricultural Academy*. 2017;(1):123–125. (In Russ.) Available at: <https://baa.by/vestnik/> (accessed 24.04.2025).
6. Zeng Z., Chen Y. Performance Evaluation of Futed Coulters and Rippled Discs for Vertical Tillage. *Soil and Tillage Research*. 2018;(183):93–99. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.06.003>
7. Sobolevsky I.V. Bionic Substantiation of the Design of the Soil Processing Working Bodies of the Disk Harrow. *Transactions of Taurida Agricultural Science*. 2019;(19):73–84. (In Russ., abstract in Eng.) <https://www.elibrary.ru/aizmzd>
8. Chirende B., Li J., Wen LG., Simalenga T. Effects of Bionic Non-Smooth Surface on Reducing Soil Resistance to Disc Ploughing. *Science China Technological Sciences*. 2010;(53):2960–2965. <https://doi.org/10.1007/s11431-010-4128-8>
9. Zhilyakov A.L., Kozlov V.G., Skuryatin N.F., Bulygin N.N., Brovchenko A.D., Shwarz A.A. Mathematical Prerequisites for Improving the Method of Sowing Crops on Sloping Lands. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Zernograd: IOP Publishing Ltd; 2021. Article no. 012075. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/659/1/012075>
10. Gao Y., Shen X., Li X., Meng Z., Sun J., Duan A. Effects of pre-Sowing Irrigation on Crop Water Consumption, Grain Yield and Water Productivity of Winter Wheat in the North China Plain. *Irrigation and Drainage*. 2015;64(4):566–574. <https://doi.org/10.1002/ird.1927>
11. Abdusalomova R.R., Balamirzoeva Z.M. Methods of Soil Protection from Water and Erosion. *Vestnik Social'no-Pedagogicheskogo Instituta*. 2021;(4):30–40. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://spi-vuz.ru/vestnik-spi.html> (accessed 24.04.2025).

12. Polushkin O.A., Ignatenko V.I., Ignatenko I.V., Vyalikov I.L., Bogdanovich V.P. Dynamic Models of Cultivator Spring Tine Performance. In: MATEC Web of Conferences. Rostov-on-Don: EDP Sciences; 2018. Article no. 01016. <https://www.elibrary.ru/jycdhw>
13. Bulgakov V., Kaletnik H., Goncharuk T. Research of the Movement of Agricultural Aggregates Using the Methods of the Movement Stability Theory. *Agronomy Research*. 2019;17(5):1846–1860. <https://doi.org/10.15159/AR.19.189>
14. Dahab M.H., Kheiry A.N.O., Numan M.H. Developed and Field Performance Evaluation of a Combined Cultivator. *Journal of Agronomy Research*. 2021;4(2):12–19. <https://doi.org/10.14302/issn.2639-3166.jar-21-3872>
15. Ju., Rantung R., Kalesaran L. Kajian Penggunaan Cultivator Tipe Motoyama MTE 70NL Untuk Pengolahan Tanah Di Lahan Kelompok Tani Syalom DESA Pinasungkulan Kecamatan Modinding. *COCOS*. 2023;15(2). <https://doi.org/DOI 10.35791/cocos.v15i2.47195>
16. Kumar A.A., Anil Kumar C., Chakrapani V., Rajesh D., Seshagiri Rao N. Development and Evaluation of Multifunctional Tillage Implement. *Current Journal of Applied Science and Technology*. 2022;41(30):46–56. <https://doi.org/10.9734/cjast/2022/v41i3031807>
17. Veselovska N.R., Shargorodskiy S.A., Burlaka S.A. Mathematical Modeling of the Interaction of the Arrow Leg of the Cultivator with the Soil. *Vibrations in Engineering and Technology*. 2023;(1):57–62. <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2023-1-6>
18. Wang M., Fu Z., Zheng Zh., Huang Y., Wei W. Effect of Performance of Soil Cultivator with Different Surface Textures of Shovel Wing. *Agriculture*. 2021;(11):1039. <https://doi.org/10.3390/agriculture11111039>
19. Baek S.-Yu., Kim W.-S., Baek S.-M., Jeon H.-H., Lee J.-H., Lee D.-H., et al. Performance Simulation of an Electric Multipurpose Cultivator According to Rotary Tillage. *Korean Journal of Agricultural Science*. 2021;48(4):1027–1037. <https://doi.org/10.7744/kjoas.20210087>
20. Syromyatnikov Yu.N. Research of the Process of the Cultivator for Continuous Tillage. *Aeconomics: Economics and Agriculture*. 2018;4(28):4. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/rraibt>
21. Lee S.-H., Kim T.-H., Shin So.-Y., Jang S.-H., Choi S.-R. Vibration Characteristics and Performance Analysis of Knapsack Type Weeding Cultivator According to Shape and Width of Blade. *Journal of Agriculture & Life Science*. 2021;55(6):83–90. <https://doi.org/10.14397/jals.2021.55.6.83>
22. Valiev A.R. Study of Qualitative Performance Indicators of Cultivator with Twin Disk-Shaped Operating Elements *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2017;(4):24–29. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/yqgaud>
23. Valiev A.R. Investigation of Soil Motion Along the Working Surface of a Disk Cultivator. *Vestnik of Kazan State Agrarian University*. 2017;12(3):54–60. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.12737/article_5a1d9587a0d852.23012684
24. Behera A., Raheman H., Thomas E.V. Comparative Study on Tillage Performance of Rota-Cultivator (a Passive – Active Combination Tillage Implement) with Rotavator (an Active Tillage Implement). *Soil & Tillage Research*. 2021;207. Article no. 104861. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104861>
25. Hosseini H., Farzad A., Majeed F. Multi-Objective Optimal Design and Development of a Four-Bar Mechanism for Weed Control. *Machines*. 2022;10(3):198. <https://doi.org/10.3390/machines10030198>
26. Priporov I.E., Kurasov V.S., Batsunov V.I. Breaking Sunflower Stubble by Needle Disk Blades of an Innovative Turbodisc Cultivator. *Engineering Technologies and Systems*. 2025;35(4):750–769. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202504.750-769>
27. Kuzychenko Yu.A. Technological Indicator of the Work of Cultivators in the Ciscaucasia. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2024;(2):94–97. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2024-106-2-94-97>

Об авторах:

Припоров Игорь Евгеньевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры тракторов, автомобилей и технической механики Кубанского государственного аграрного университета имени И. Т. Трубилина (350044, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. им. Калинина, д. 13), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8201-2819>, Scopus ID: 57214999941, Researcher ID: N-4901-2016, SPIN-код: 4330-0224, i.priporov@yandex.ru

Technologies, machinery and equipment

Курасов Владимир Станиславович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой тракторов, автомобилей и технической механики Кубанского государственного аграрного университета имени И. Т. Трубилина (350044, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. им. Калинина, д. 13), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1733-9436>, SPIN-код: 7925-1853, kurasoff@gmail.com

Бацунов Владимир Игоревич, аспирант кафедры тракторов, автомобилей и технической механики Кубанского государственного аграрного университета имени И. Т. Трубилина (350044, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. им. Калинина, д. 13), ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2865-3674>, vovasvovas70@bk.ru

Вклад авторов:

И. Е. Припоров – формулирование идеи исследования, целей и задач; создание и подготовка рукописи: критический анализ черновика рукописи, внесение замечаний и исправлений, в том числе на этапах до и после публикации.

В. С. Курасов – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение сбора данных; создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования.

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

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 22.04.2025; поступила после рецензирования 20.10.2025;
принята к публикации 14.11.2025*

About the authors:

Igor E. Priporov, Dr.Sci. (Eng.), associate professor, professor department of tractors, automobiles and technical mechanics, I. T. Trubilin Kuban State Agricultural University (13 Kalinin St., Krasnodar 350044, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8201-2819>, Scopus ID: 57214999941, Researcher ID: N-4901-2016, SPIN code: 4330-0224, i.priporov@yandex.ru

Vladimir S. Kurasov, Dr.Sci. (Eng.), associate professor, head of the department of tractors, automobiles and technical mechanics, I. T. Trubilin Kuban State Agricultural University (13 Kalinin St., Krasnodar 350044, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1733-9436>, SPIN code: 7925-1853, kurasoff@gmail.com

Vladimir I. Batsunov, Post-Graduate Student of the Department of Tractors, Automobiles and Technical Mechanics, I. T. Trubilin Kuban State Agricultural University (13 Kalinin St., Krasnodar 350044, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2865-3674>, vovasvovas70@bk.ru

Authors contribution:

I. E. Priporov – formulating the study idea, goals and objectives; preparing the manuscript: critical analysis of the draft manuscript, making comments and corrections, including at the stages before and after publication.

V. S. Kurasov – conducting the study, including conducting experiments and collecting data; preparing the manuscript: visualizing the study results

V. I. Batsunov – conducting the study, including conducting experiments and collecting data; preparing the manuscript: visualizing the study results.

All authors have read and approved the final manuscript

Submitted 22.04.2025; revised 20.10.2025; accepted 14.11.2025

**ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ /
TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT**<https://doi.org/10.15507/2658-4123.036.202601.041-058>EDN: <https://elibrary.ru/mmkrgv>

УДК / UDK 637.146

*Оригинальная статья / Original article***Реологические свойства продуктов на молочной основе, обогащенных пектиносодержащим пюре кизила (*Cornus mas L.*)****Ю. Б. Гербер, Т. В. Калиновская** , **Т. Ю. Брановицкая**
*Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского,
г. Симферополь, Российская Федерация, <https://ror.org/05erbjx97>*
 *kalinovskaya_88@mail.ru**Аннотация*

Введение. Ухудшение экологической обстановки во многих регионах России, сопровождающееся загрязнением окружающей среды и пищевых продуктов токсическими веществами и радионуклидами, требует обеспечения безопасности продуктов питания и проведения профилактических мероприятий, обуславливая использование пектина как природного детоксиканта. Большой потенциал в разработке технологий извлечения пектина, а также производства пектинопродуктов, в том числе функционального назначения на молочной основе, заложен в возможности использования плодовых культур с учетом зональных особенностей. Для Крыма такой плодовой культурой является кизил, содержащий комплекс биологически активных компонентов, в частности пектиновых веществ. Исследование по усовершенствованию технологии производства йогурта, обогащенного пюре из кизила, является актуальным, так как включение кизила в его состав может способствовать повышению пищевой и биологической ценности, улучшению вкусовых и структурных характеристик, расширению ассортимента молочных продуктов.

Цель исследования. Определение влияния свойств кизила как наполнителя на реологические параметры продукта на молочной основе (на примере йогурта), а также определение аналитических характеристик пектиновых веществ, содержащихся в исследуемых плодах кизила, выращенного на территории Республики Крым.

Материалы и методы. Объектом исследования является технология производства йогурта, обогащенного пюре из кизила. Использовался кизил вида мужской (*Cornus mas L.*) двух сортов: Крымский и Азовский. Сбор кизила производился в период зрелости в Симферопольском районе Республики Крым. Для реализации эксперимента использовались химические реактивы, центрифуга, сушильный шкаф, термостат. Количественный и качественный анализ пектинов сырья кизила осуществляли стандартизированным кондуктометрическим способом. Вязкость продукта определяли с помощью экспресс-анализатора консистенции ЭАК-2М путем построения тарировочного графика по показателю дистиллированной воды.

Результаты исследования. Содержание водорастворимого пектина колеблется в пределах 0,25–0,32 % к массе сухих веществ, что для сорта Крымский составляет 10,8 г/кг, для сорта Азовский – 10,3 г/кг. В количественном соотношении среди нативных пектинов этерифицированных молекулярных структур больше, порядка 55,72–65,12 %.

© Гербер Ю. Б., Калиновская Т. В., Брановицкая Т. Ю., 2026

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

Проведено исследование реологических свойств йогурта, а также исследуемых образцов с добавлением пюре кизила в количестве 20 % по массе, которое показало повышение вязкости продукта с добавлением пюре кизила.

Обсуждение и заключение. Определение количественных характеристик пектиновых веществ кизила дает возможность определить функционально-технологические свойства и указывает на перспективность использования плодов кизила как ценного местного пектиносодержащего сырья. Графические зависимости показывают, что опытный образец йогурта с пюре из кизила имеет большую устойчивость к снижению вязкости при повышении температуры в сравнении с контрольным образцом за счет наличия в составе высокоэтерифицированных пектиновых веществ. Усовершенствованная технология обогащенного йогурта может быть внедрена на молокоперерабатывающих предприятиях в цехах по производству кисломолочных продуктов после незначительной модернизации производства.

Ключевые слова: кизил, пектиносодержащее сырье, высокоэтерифицированный пектин, аналитические характеристики, реологические свойства

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Гербер Ю.Б., Калиновская Т.В., Брановицкая Т.Ю. Реологические свойства продуктов на молочной основе, обогащенных пектиносодержащим пюре кизила (*Cornus mas L.*). *Инженерные технологии и системы*. 2026;36(1):41–58. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.036.202601.041-058>

Rheological Properties of Milk-Based Products Enriched With Pectin-Containing Dogwood Puree (*Cornus mas L.*)

Y. B. Gerber, T. V. Kalinovskaya , T. Y. Branovitskaya
V. I. Vernadsky Crimean Federal University,
Simferopol, Russian Federation, <https://ror.org/05erbjx97>

 kalinovskaya_88@mail.ru

Abstract

Introduction. The environmental deterioration in many regions of Russia, accompanied by food pollution with toxic substances and radionuclides, requires food safety and of preventative measures that determines the use of pectin as a natural detoxifier. The use of fruit crops taking into account local condition has a significant potential for developing pectin extraction technologies and producing pectin products, including milk-based ones for functional use. In the Crimea, such a fruit crop is dogwood containing a complex of biologically active components, in particular pectin substances. Research into improving the technology of producing yogurt enriched with dogwood puree is relevant, because of the dogwood inclusion into yogurt composition can improve its nutritional and biological value, taste and texture, and expand the range of dairy products.

Aim of the Study. The study is aimed at determining the effect of dogwood properties as a filler on the rheological parameters of a milk-based product (on the example of yogurt), and at determining the analytical characteristics of pectin substances contained in the studied dogwood fruits grown in the Republic of Crimea.

Materials and Methods. The object of the study is producing yogurt enriched with dogwood puree. There was used the dogwood (*Cornus mas L.*) of two varieties: Krymsky and Azovsky. The dogwood fruits were harvested when they reached full maturity in the Simferopol district of the Republic of Crimea. When conducting the experiments, there were used chemical reagents, a centrifuge, a drying oven, and a thermostat. Quantitative and qualitative analysis of the dogwood pectins was performed using a standardized conductometric method. The viscosity of the product was determined using the express consistency analyzer EAK-2M by constructing a calibration graph based on the values of distilled water.

Results. It was found that water-soluble pectin content ranges from 0.25–0.32% of dry weight that is 10.8 g/kg for the Krymsky variety and 10.3 g/kg for the Azovsky variety. In quantitative terms, among native pectins, there are more esterified molecular structures, approximately 55.72–65.12%. There were studied the rheological properties of yogurt and samples containing 20% dogwood puree weight. The results of the experiment demonstrated an increase in the viscosity of the product with the addition of dogwood puree.

Discussion and Conclusion. Quantitative characterization of dogwood pectin substances makes it possible to determine their functional and technological properties and demonstrates promise for using dogwood fruits as valuable local pectin-containing raw material. The graphical dependences show that compared to the control sample, the experimental yogurt sample with dogwood puree shows greater resistance to viscosity loss with increasing temperature due to the presence of highly esterified pectin substances. This improved enriched yogurt technology can be used in milk processing plants producing fermented milk products after minor production upgrades.

Keywords: dogwood, pectin-containing raw materials, highly esterified pectin, analytical characteristics, rheological properties

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

For citation: Gerber Y.B., Kalinovskaya T.V., Branovitskaya T.Y. Rheological Properties of Milk-Based Products Enriched with Pectin-Containing Dogwood Puree (*Cornus mas L.*) *Engineering Technologies and Systems*. 2026;36(1):41–58. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.036.202601.041-058>

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важнейших факторов, определяющих состояние здоровья населения, является питание. Обеспечение адекватным питанием, в том числе функциональным для детерминированных групп потребителей с учетом возраста, пола, рода деятельности, является важнейшей проблемой современной нутрициологии. В качестве решения этой задачи предлагается разработка новых технологий производства продуктов функционального назначения, отвечающих не только физиологическим потребностям организма человека в пищевых веществах, но и выполняющих профилактические и функционально-технологические функции. Обеспечение населения такими продуктами имеет важное социально-экономическое значение.

Важное место в решении данной проблемы принадлежит пектиносодержащим пищевым продуктам. Пектиновые вещества содержатся во всех высших растениях, входят в состав клеточных стен, срединных пластинок, цитоплазмы растительных клеток. Благодаря своим специфическим свойствам они выполняют ряд важных функций (регулирование водного режима тканей, транспорт водного тока и др.), принимают участие в процессах роста клеточных стенок. Пектины обнаружены в некоторых водорослях и морских травах. Содержание пектиновых веществ и их химический состав неодинаковы у разных видов растений, их составляющих, тканей и зависят от метеорологических условий выращивания, географической зоны, сорта, периода развития и возраста растения. Поэтому пектиновые полисахариды рассматривают как один из самых сложных и динамичных по структуре класс биополимеров.

Функциональные группы, обуславливающие аналитические характеристики пектиновых веществ, позволяют оценить физико-химические и функционально-технологические свойства пектинов, служат критерием для рекомендации их применения в качестве пектиносодержащего сырья при производстве пищевых продуктов.

С целью разработки структурированной молочной продукции при использовании крымского пектиносодержащего сырья проведены теоретические и экспериментальные исследования, подтверждающие возможность применения в качестве наполнителя пюре из кизила (*Cornus mas L.*).

Как большинство гидроколлоидов, пектины характеризуются рядом технологически значимых свойств: растворимость в воде, способность к студнеобразованию, взаимодействие с ионами одно- и двухвалентных металлов. Они зависят от качественного состава макромолекулы биополимера: молекулярной массы, присутствия и количества карбокси-групп, вариативных замещений (солевой или сложноэфирный остаток) и их количества. На способность к студнеобразованию оказывают влияние физические параметры процесса (температура, pH) и присутствие определенных веществ, например сахаров [1].

Реакционно способные функциональные группы пектинов дают возможность в целом оценить их технологические свойства и разработать определенные рекомендации по использованию природного растительного сырья (в данном случае плодов кизила) в технологиях производства молочной продукции с комбинированным составом. Данный факт указывает на необходимость исследования физико-химических характеристик нативно содержащихся в кизиле гидроколлоидов, структурно-механических характеристик системы с комбинированным составом, роли и природы взаимодействия составных компонентов в формировании показателей качества продукта.

Реологические методы играют важную роль в изучении совместного действия физико-химических и механических факторов при формировании и регулировании структурно-механических свойств пищевых дисперсных систем непосредственно во время технологического процесса. Структурно-механические характеристики дают общую информацию о качестве продукта в целом, об эффективности его производства, позволяя решить проблемы оптимизации технологических и механических условий процесса, выбора аппаратного оснащения и системы контроля.

Дисперсные системы, такие как кисломолочные продукты, находятся в связанном состоянии, т. е. частицы связаны друг с другом молекулярными силами и образуют структуру – пространственный каркас. Ее определяют:

- химический состав (массовая доля белков и жира в молоке, вид заквасочных культур, вид используемых стабилизаторов и наполнителей);
- гидратационные свойства высокомолекулярных соединений, изменение их физических характеристик и технологических свойств в производственном цикле обработки;
- режимы технологического процесса (температура пастеризации, давление гомогенизации, температура и длительность сквашивания, охлаждения и хранения).

Формирование и стабилизацию физических характеристик кисломолочных продуктов в значительной степени обуславливает вязкость многокомпонентных систем.

Содержание пектина в молочных продуктах позволяет равномерно распределять фруктовый компонент в упаковочной таре, получать однородный состав при перемешивании с кисломолочным продуктом и повышать срок хранения готового товара. В составе йогуртов с фруктовыми наполнителями пектиновые

вещества усиливают их вкусовые качества. Этот факт крайне важен для условий юга страны, в частности Крыма, где широко представлен спектр выращиваемой плодово-ягодной продукции, характерной для субтропиков.

Так, необходимость рекомендовать проведение контроля вязкости кисломолочных продуктов в зависимости от способов производства является актуальной.

Целью исследования является определение физико-химических свойств пектиновых веществ плодов кизила, выращенного на территории Республики Крым, и их влияния на реологические параметры продукта на молочной основе (на примере йогурта).

В задачи исследования входило определение аналитических и физико-химических характеристик пектиновых веществ кизила, что обусловлено необходимостью оценки его качества, а также областью применения в качестве природного стабилизатора для молочных продуктов. Для этого проведена оценка структурно-механических характеристик йогурта с использованием пектинового пюре из кизила, исследованы реологические характеристики, такие как вязкость продукта.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Одним из существенных факторов, влияющих на вязкость кисломолочных продуктов, является вид и свойства стабилизатора. Его действие проявляется в связывании свободной воды и повышении вязкости. Традиционными стабилизаторами природного происхождения для производства молочных продуктов является агар, каррагенан, камеди, крахмал, желатин, пектин. Наиболее доступным, биологически ценным и технологически эффективным из них является пектин – важнейший ингредиент продуктов здорового питания.

Потенциально важной пектинодержательной дикорастущей плодовой культурой на территории Республики Крым является кизил обыкновенный. Его плоды представляют собой ценный источник большого количества полезных веществ: витаминов и провитаминов (С, Р, А), микро- и макроэлементов (К, Fe, Mg, S, Na, Ca, P, Zn), группы пектинов, дубильных и красящих веществ, в том числе антоцианов. Большую роль в органолептических показателях данной плодовой культуры играют органические кислоты (яблочная, винная, лимонная, янтарная, глиоксалиевая, фенолкарбоновые), сахара (фруктоза, глюкоза и др.), эфирные масла [2; 3].

Пектиновые вещества являются одними из важных функциональных ингредиентов плодового сырья для пищевой промышленности. Количественный и качественный состав пектиновых соединений в природном растительном сырье неоднозначен. В зависимости от вида растений, климатических и метеорологических условий произрастания количество, состав и свойства пектиновых веществ изменяются.

Анализ зарубежной и отечественной литературы показывает, что состав и структура многих пектиновых веществ до сих пор недостаточно изучены [4]. На протяжении многих лет используются различные методы исследования и характеристики пектиновых полисахаридов. Значительное количество используемых в настоящее время методов основано на измерении и интерпретации коллигативных свойств и характеристике моносахаридного состава. Эти методы подтверждают потенциальную возможность в понимании как структурных, так

и функциональных особенностей гетерогенности пектиновых макромолекул. Поэтому исследование строения индивидуальных полимеров и анализа степени их гетерогенности в пределах образца представляет важный вклад в понимание биологических макромолекул [5–7].

Состав молекул пектинов, выделяемых из разных растительных объектов, имеет свои отличные свойства по молекулярной массе, степени этерификации, присутствию ацелированных гидроксильных групп [8–10]. Структура и химический состав пектиновых веществ определяют пространственную форму их молекул и характер взаимодействия с другими соединениями [11–13]. Особенности химического распределения пектиновых молекул, а именно степень этерификации, определяет разнообразие их физико-химических свойств, основными среди которых являются растворимость, структуро- и комплексообразующая способности [14–16]. Ограниченность данных о пектиновых веществах плодов кизила доказывает необходимость проведения исследований их свойств.

Большой вклад в развитие новых и оптимизации имеющихся технологий производства пектина и пектинопродуктов внес Л. В. Донченко [9], а также отечественные ученые научно-исследовательского института «Биотехнологии и сертификации пищевой продукции» [16–17]. Основным научно-инновационным проектом данного НИИ является разработанная технология жидкого пектина и новых видов функциональных продуктов питания на его основе с высокой пищевой ценностью.

Исследования пектиновых веществ разных видов растительного сырья (характерного для данного региона), проводят ученые ведущих научно-исследовательских институтов и вузов страны: Красноярского аграрного государственного университета [18; 19], Сибирского федерального университета [20], Всероссийского научно-исследовательского института селекции плодовых культур совместно с Орловским государственным университетом имени И. С. Тургенева [21], Майкопского государственного технологического университета [22], Воронежского государственного университета инженерных технологий [23]. Активным изучением пектиновых веществ занимаются ученые Кубанского государственного аграрного университета [24–26]. Проведены исследования по изучению фракционного состава пектиновых веществ различного растительного сырья, произрастающего в Краснодарском крае и Северном Кавказе. Ученые описали научные принципы получения пектина, оптимизировали технологические условия выделения пектиновых веществ из различных видов растительного сырья, в частности из дикорастущего плодово-ягодного [27–29].

В настоящее время пектин как природный комплексообразователь вызывает повышенный интерес не только потому, что он недостаточно изучен мировой практикой, но и потому, что его применение крайне необходимо в условиях ухудшения экологической ситуации. Создание симбиотических молочных продуктов, имеющих профилактическое действие и включающих пробиотические культуры микроорганизмов и пребиотический фактор, является существенной проблемой современности, поэтому разработка технологии получения пектинопродуктов с высокими комплексообразующими свойствами является актуальной задачей для пищевой промышленности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект и материалы исследования

В качестве объекта исследования представлена технология производства йогурта, обогащенного пюре из кизила. Предметом исследования является: молоко-сырье, которое используется при производстве йогурта, закваски Угличской «Экспериментальной биофабрики»; термофильные молочнокислые (*Streptococcus Thermophilus*) и пробиотические (*Lactococcus Lactis* Subsp.) культуры; кизил обыкновенный (ягоды и пюре); ферментированные молочные сгустки в течение сквашивания; готовый продукт (контрольный образец сквашивался без добавления кизила); образцы с разной дозировкой сахара и кизила.

Для исследований использовался кизил вида мужской (*Cornus mas* L.) сорта Крымский и Азовский, собранный в Симферопольском районе Республики Крым в период зрелости.

Химические реактивы

В ходе эксперимента были использованы: раствор уксусной кислоты концентрацией 1 моль/дм³, раствор соляной кислоты концентрацией 0,05 моль/дм³, этиловый спирт 96 %, раствор щелочи NaOH с концентрациями 0,01 и 0,05 моль/дм³, раствор соли MgSO₄, раствор соли CaCl₂, индикатор Хинтона, вода дистиллированная.

Оборудование

Для проведения эксперимента использовались центрифуга, сушильный шкаф, термостат, экспресс-анализатора консистенции ЭАК-2М.

Методы и процедура исследования

С целью выявления промышленной значимости плодов кизила в качестве источника пектиновых соединений и определения функционально-технологических свойств исследовали содержание пектиновых веществ и их аналитические характеристики. Плоды кизила были подвергнуты химическому анализу на предмет определения количества общих сухих веществ, водорастворимых пектиновых веществ, количественного и качественного состава пектинов мякоти плодов кизила.

Метод определения водорастворимых пектиновых веществ основан на переводе протопектина в растворенное состояние, омылении растворимых пектинов, осаждении полигалактуроновой кислоты кальцием и гравиметрическом определении осадка.

Навеску продукта (25 г пюре из кизила) растерли с промытым песком до однородной массы, перенесли в коническую колбу вместимостью 250 см³ со 100 см³ дистиллированной воды, нагретой до 45 °С. К 25 мл полученного фильтрата добавили 100 мл 0,01 моль/дм³ раствора NaOH, оставили на 20–30 минут для омыления растворимого пектина. В итоге весь пектин перешел в натриевую соль полигалактуроновой кислоты. После этого к раствору добавили 50 мл уксусной кислоты. Через 5 минут к полигалактуроновой кислоте добавили 50 см³ раствора хлорида кальция, в результате чего образовался осадок пектата кальция. Осадок отстаивали в течении 1 часа, отфильтровали и промыли на предварительно взвешенном фильтре горячей водой до исчезновения ионов хлора в промывных водах (проба на хлорид серебра). Осадок высушили на фильтре при 100 °С и взвесили. Расчитали количество водорастворимого пектина в исследуемой мякоти кизила.

Качественный анализ пектинов мякоти плодов кизила включал определение числа свободных карбокси-групп макромолекулы, вариативности и степени их замещения, наличия других функциональных группировок¹.

Количественный и качественный анализ пектинов сырья кизила осуществляли стандартизированным методом кондуктометрического титрования. Он основан на титровании щелочью предварительно выделенного гидратопектина из средней пробы измельченных гидролизованных плодов. В результате кондуктометрического титрования определили содержание карбоксильных групп – свободных и этерифицированных [6–8]. Методика определения: в колбы объемом 250 см³ поместили навески подготовленных проб измельченных плодов кизила по 50 г, добавили 100 см³ дистиллированной воды 60 °С. Колбы встряхивали 30 минут, экстракт отделили на центрифуге.

Для определения суммы пектиновых веществ (протопектина и гидратопектина) провели кислотный гидролиз. Для выделения гидратопектина из протопектина навеску залили раствором соляной кислоты концентрацией 0,05 моль/дм³ объемом 100 см³, нагрели при температуре 90 °С в течении 30 минут. Полученный гидролизат перенесли в мерную пробирку на 200 см³, выдержали 90 минут, центрифугировали. Затем к экстракту добавили двойное количество спиртово-кислотной смеси, перемешали и выдержали 90 минут.

Полученный осадок отфильтровали, промыли этанолом с соляной кислотой, затем только спиртом. Осадок высушили в сушильном шкафу до постоянной массы. Количество гидратопектина и протопектина вычислили по разности общего содержания пектина.

Осадок растворили в воде с температурой 60 °С, охладили, добавили индикатор Хинтона, титровали раствором щелочи NaOH концентрацией 0,05 моль/дм³. Эквивалентную точку определили при изменении цвета с желтого в малиновый. По количеству реагента, потраченного на титрование, определили количество свободных карбокси-групп. Их содержание K_c , % рассчитали по формуле:

$$K_c = \frac{a}{G_1} \cdot 0,45,$$

где a – количество реагента (щелочи), пошедшей на титрование, см³; G_1 – навеска пектиновых веществ, г. К полученному раствору добавили 20 см³ раствора щелочи NaOH концентрацией 0,01 моль/дм³, выдержали 30 мин, добавили соляную кислоту HCl концентрацией 0,01 моль/дм³, титровали раствором щелочи NaOH 0,05 моль/дм³. Результат второго титрования пропорционален количеству этерифицированных карбоксильных групп.

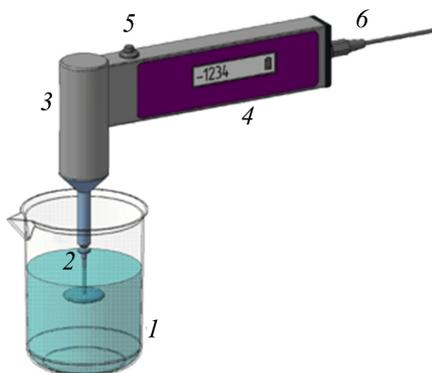
После определения свободных карбоксильных групп к раствору добавили 10 см³ щелочи NaOH концентрацией 0,05 моль/дм³. Колбу, закрытую пробкой, выдержали два часа в обычных условиях для проведения процесса гидролиза. Определение количества метаксилированных карбоксильных групп заключалось в добавлении к полученному раствору 10 см³ соляной кислоты HCl концентрацией

¹ ГОСТ 29059-91. Продукты переработки плодов и овощей. Титриметрический метод определения пектиновых веществ. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200022903> / (дата обращения: 03.04.2025).

0,05 моль/дм³ и титрованием щелочью NaOH концентрацией 0,01 моль/дм³. Рассчитали количество метаксилированных карбоксильных групп.

Для определения количества ацетильных групп навеску гидратопектина весом 1 г поместили в колбу объемом 50 см³, добавили 25 см³ раствора NaOH, выдержали восемь часов. По прошествии отведенного времени довели до метки дистиллированной водой. Согласно стандартной методике, в полученный раствор добавили 20 см³ раствора соли MgSO₄. Дистилляционную колбу нагрели до получения дистиллята. Для установления количества ацетильных групп в гидратопектине 1 см³ дистиллята титровали 0,1 н раствором щелочи NaOH в присутствии индикатора фенолфталеина.

Вязкость продукта определили с помощью экспресс-анализатора консистенции ЭАК-2М (рис. 1), который относится к типу ротационных вискозиметров. Принцип действия данного анализатора основан на измерении величины механического момента сопротивления вращению насадки, погруженной в анализируемое вещество. Сопротивление пропорционально вязкости анализируемого вещества. Показания на индикаторе анализатора соответствуют этому сопротивлению, следовательно и вязкости (консистенции) анализируемого вещества.



Р и с. 1. Устройство экспресс-анализатора консистенции ЭАК-2М:

- 1 – стакан с анализируемым веществом; 2 – сменная дисковая насадка;
3 – головка с электродвигателем; 4 – корпус с блоком управления и индикатором;
5 – кнопка управления; 6 – штекер блока питания

F i g. 1. Express Consistency Analyzer EAK-2M:

- 1 – container with the analyzed substance; 2 – replaceable disk attachment; 3 – head with electric motor;
4 – housing with control unit and indicator; 5 – control button; 6 – power supply connector

Источник: рисунок 1 взят с сайта лабораторного оборудования [Электронный ресурс]. URL: http://petrolabspb.ru/viskozimetry/article_post/ekspress-analizator-konsistentsii-eak-2m-viskozimetr-rotatsionnyy (дата обращения: 15.04.2025).

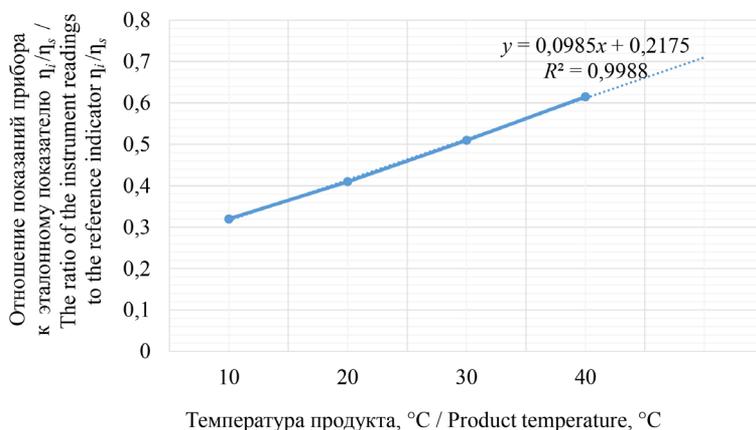
Source: Figure 1 has been taken from the laboratory equipment website [Electronic resource]. URL: http://petrolabspb.ru/viskozimetry/article_post/ekspress-analizator-konsistentsii-eak-2m-viskozimetr-rotatsionnyy (date of access: 15.04.2025).

Затем графическим методом путем построения тарировочного графика определили значение вязкости в МПа·с в температурном диапазоне от +5 до +50 °С.

Приведенный диапазон обусловлен тем, что он охватывает все температурные значения производства, транспортировки и хранения исследуемой продукции. В качестве контроля взят йогурт питьевой с показателями: массовая доля жира – 2,5 %, белков – 3 %. На основании проведенных ранее исследований обоснован состав комбинированной закваски: с соотношением термофильных молочнокислых (*Streptococcus Thermophilus*) и пробиотических (*Lactococcus Lactis Subsp.*) культур – 1:2 [30].

В качестве вкусового наполнителя использовали пюре из кизила с сахаром в количестве 20 % к массе йогурта. Массовая доля компонента определена ранее опытным путем [30]. Вязкость образцов йогурта исследовались при различных температурах.

На рисунке 2 приведена зависимость соотношения η_i/η_s (от температуры исследуемой среды, где η_i – показание прибора при замере вязкости; η_s – эталонные показания вязкости для этой же среды в тех же условиях. Установлены корреляционные зависимости в виде полиномов второй степени между эталонными показаниями вязкости и температурой продукта.



Р и с. 2. Калибровочный график

F i g. 2. Calibration chart

Примечание: y – уравнении линии тренда; R^2 – величина достоверности аппроксимации.

Note: y – trend line equation; R^2 – value of approximation reliability.

Источник: графики для рисунков 2, 3 составлены авторами статьи в программе *Microsoft Excel*.

Source: The graphs for figures 2, 3 was compiled by the authors of the article in *Microsoft Excel*.

После проведенных замеров с помощью калибровочного графика определили значение вязкости в МПа·с. По полученным значениям построили сравнительные зависимости вязкости для двух вариантов продукта с содержанием различных сортов кизила в сравнении с контролем.

С целью выявления технологических свойств пектинсодержащего сырья кизила определили содержание водорастворимой фракции: содержание водорастворимого пектина.

Одной из ключевых характеристик природных и промышленно выпускаемых пектинов считается степень его этерификации: количество сложноэфирных связей функциональной карбокси-группы галактуроновой кислоты [18].

Количество сложноэфирных связей является главным показателем пектина и выражается отношением количества метоксилированных групп к их общему количеству в пектиновых веществах. Степень этерификации определяет свойства пектина – его растворимость, студнеобразующую способность и механизм студнеобразования.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Плоды кизила являются лидерами среди культивируемых растений по содержанию сухих веществ. Результаты проведенных исследований показывают, что содержание сухих веществ в сорте Азовский составляет 24,6 %, в сорте Крымский – 29,9 %.

Результаты определения аналитических характеристик пектиновых веществ кизила исследуемых сортов приведены в таблице.

Т а б л и ц а

T a b l e

Качественный состав пектинов исследуемых сортов
Qualitative composition of pectin substances of the studied dogwood varieties

| Наименование плодового сырья / Name of fruit raw materials | Качественный состав пектиновых веществ / Qualitative composition of pectin substances | | | |
|---|--|---|---|---|
| | Степень этерификации, % / Degree of esterification, % | Количество свободных карбокси-групп, % / Number of free carboxy groups, % | Количество ацетил-групп, % / Number of acetyl groups, % | Количество метокси-групп, % / Number of methoxy groups, % |
| Кизил сорта Крымский / Dogwood variety Crimean | 66,72 | 2,00 | 0,30 | 6,47 |
| Кизил сорта Азовский / Dogwood variety Azovsky | 65,12 | 2,00 | 0,31 | 6,84 |

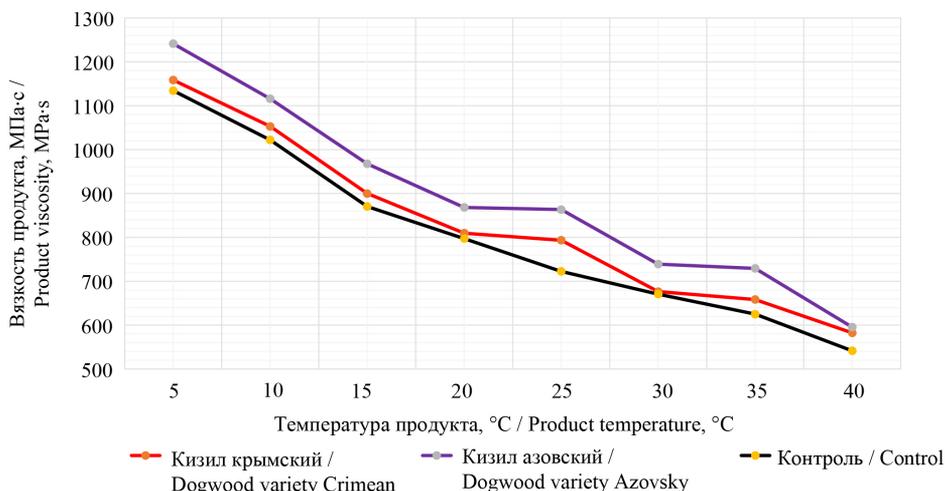
Содержание водорастворимого пектина в кизиле колеблется в пределах 0,25–0,32 % к массе сухих веществ, что составляет для сорта Крымский 10,8 г/кг, для сорта Азовский – 10,3 г/кг. На основании данных таблицы можно сделать вывод, что степень этерификации пектина кизила высокая, т. е. пектин относится к высокоэтерифицированным, и процесс желирования будет происходить в условиях большого количества сахара и низкого значения рН.

Растворимость, способность вступать в реакцию с ионами металлов и образовывать студни зависит от соотношения в молекуле пектина свободных и этерифицированных карбокси-групп. Ацетильные группы, связанные с гидроксильными, значительно ухудшают студнеобразующие свойства пектинов. Как видно из данных таблицы, в пектине кизила небольшое содержание ацетильных групп (меньше

единицы). В результате исследований установлено, что пектин, содержащий большое количество метоксильных групп и низкое количество ацетильных обладает хорошей способностью к студнеобразованию [9].

Для выяснения механизма формирования и стабилизации структуры продуктов на молочной основе с пектиносодержащим сырьем кизила исследовали роль растворимого пектина и других компонентов, которые могут влиять на реологические характеристики многокомпонентных смесей.

На рисунке 3 представлены кривые вязкости для образцов.



Р и с. 3. Динамика изменения вязкости исследуемого продукта от температуры
 F i g. 3. Dynamics of viscosity changes of the studied product depending on temperature

При добавлении наполнителя кизила йогурт приобретает вязкую однородную консистенцию, которую можно оценить показателем динамической вязкости η , МПа·с.

Исследование реологических свойств йогурта, а также исследуемых образцов с добавлением пюре кизила в количестве 20 % по массе показало повышение вязкости продукта; наблюдается некоторая стабилизация структуры при изменении температуры в интервалах +20...+25 °С, +30...+35 °С; причем более выраженный эффект наблюдается для сорта кизила Азовский.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Согласно результатам исследований для плодов кизила крымских сортов степень этерификации составляет: для сорта Азовский – 65,12 %, для сорта Крымский – 66,72 %. На основании этих данных можно сделать вывод, что степень этерификации пектина кизила высокая, т. е. пектин относится к высокоэтерифицированным. Такие пектины содержат больше 50 % этерифицированных остатков галактуроновой кислоты.

Гидратопектин кизила содержит небольшое количество ацетильных групп (0,3 %), т. е. обладает хорошими студнеобразующими свойствами.

Существенное значение оказывает количество метоксильных групп, от которых зависит растворимость и студнеобразующая способность. Содержание метоксильных групп (6,5–6,8 %) в гидратопектине плодов кизила указывает на целесообразность применения этого сырья для получения пектиносодержащих продуктов, так как его степень растворимости больше, а студнеобразующая способность лучше [10].

Графические зависимости показывают, что опытный образец с кизилом имеет большую устойчивость к снижению вязкости при повышении температуры в сравнении с контрольным образцом. С повышением температуры продукта, изменение вязкости в меньшей степени происходит в опытном образце; наблюдается стабилизация структуры; в частности, этот эффект наблюдается в интервалах +20...+25 °С, +30...+35 °С.

Установлено, что характер реологических кривых позволяет отнести йогурт с добавлением пюре из кизила по типу структуры к структурированным жидкостям. Преобладающую роль в формировании прочностных характеристик кисломолочного продукта с пектиносодержащим пюре кизила играют измельченные частицы растительного сырья, которые состоят из целлюлоз, гемицеллюлоз и других пищевых волокон, за счет образования многочисленных низкоэнергетических связей между собой и белками молока, что обуславливает увеличение вязкости и необходимый технологический эффект.

Важным фактором, обеспечивающим стабильность кисломолочных продуктов, является показатель активной кислотности. В результате молочнокислого брожения молока при производстве йогурта заквасочными микроорганизмами термофильных молочнокислых (*Streptococcus Thermophilus*) и пробиотических (*Lactococcus Lactis* Subsp.) культур нейтрально заряженное молоко с рН 6,6 снижается до рН 4,7. При добавлении в йогурт наполнителя из кизила, содержащего в составе свободные органические кислоты, фенолкарбоновые кислоты, аскорбиновую кислоту (содержание аскорбиновой кислоты в пюре кизила составляет 106 мг/100 г), среда йогурта изменяется до рН 4,0.

Пониженное значение рН (около 4) приближается к изоэлектрической точке казеина молока, одновременно способствуя гелеобразованию высокоэтерифицированных пектинов, и приводит к повышению физической стабильности продукта. Таким образом, значение рН кисломолочных продуктов и их кислотность оказывают значительное влияние на диссоциацию пектина и, как следствие, на его способность вступать во взаимодействие с ионами кальция молока.

Таким образом, для образования структурного каркаса, необходимого при формировании и стабилизации структуры йогурта с комбинированным составом, целесообразно использовать пектиносодержащее пюре кизила в качестве вкусового наполнителя, обладающего биологически ценными компонентами, в том числе пищевыми волокнами.

Определение качественных характеристик пектиновых веществ кизила указывает на целесообразность применения данного сырья для стабилизации структуры кисломолочных продуктов. Перспективой исследования является изучение внесения пюре из кизила в качестве пектиносодержащего сырья в технологии структурированных пищевых продуктов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Жидехина Т.В., Попов А.С. Реализация потенциала продуктивности интродуцированных сортов кизила в условиях Тамбовской области. *Плодоводство и виноградарство Юга России*. 2015;(31):81–89. URL: <http://www.journalkubansad.ru/archive/31/> (дата обращения: 15.04.2025).
2. Хасанова Д.А. Кизил как лекарственное растение. *Биология и интегративная медицина*. 2016;(4):45–54. URL: <http://integmed.uz/> (дата обращения: 15.04.2025).
3. Тры А.В., Михеева Л.А. Влияние различных факторов на выход пектиновых веществ, выделенных из растительного сырья. *Региональные геосистемы*. 2014;(23):123–128. <https://www.elibrary.ru/thqxsxv>
4. Mukhsddinov Z.K., Khalikov D.Kh., Abdusamiev F.T., Avloev Ch.Ch. Isolation and Structural Characterization of a Pectin Homo and Rhamnogalacturonan. *Talanta*. 2000;53(1):171–176. [http://doi.org/10.1016/S0039-9140\(00\)00456-2](http://doi.org/10.1016/S0039-9140(00)00456-2)
5. Колотий Т.Б., Хатко З.Н. Аналитические характеристики пектина из некоторых видов дикорастущих плодов и ягод предгорной зоны Адыгеи. *Новые технологии*. 2012;(3):30–32. <https://elibrary.ru/pnqbsl>
6. Грабишин А.С. О некоторых особенностях технологий производства пектина. *Новые технологии*. 2010;(2):30–34. <https://www.elibrary.ru/mubfav>
7. Цугленок Н.В., Типсина Н.Н., Катасанова О.Ю. Эффективные технологии производства пектина и его использование в пищевой промышленности. *Вестник КрасГАУ*. 2006;(10):331–334. <https://www.elibrary.ru/kxneof>
8. Кварацхелия В.Н., Родионова Л.Я. Изменение аналитических характеристик пектиновых веществ яблок зимнего срока созревания при длительном влиянии низких температур. *Политематический сетевой электронный научный журнал кубанского государственного аграрного университета*. 2014;(100):1193–1203. URL: <http://ej.kubagro.ru/2014/06/pdf/> (дата обращения: 20.04.2025).
9. Донченко Л.В., Едыгова С.Н., Колотий Т.Б., Арутюнова Г.Ю. Фракционный состав пектиновых веществ айвы и дикорастущего сырья. *Известия вузов. Пищевая технология*. 2008;(2-3):118–119. <https://elibrary.ru/jvypol>
10. Арутюнова Г.Ю., Родионова Л.Я., Стальная М.И. Студнеобразующие и комплексообразующие свойства пектинов алычи. *Новые технологии*. 2009;(1):11–13. <https://elibrary.ru/kfautf>
11. Хайтметова С.Б., Тураев А.С., Мухитдинов Б.И., Халилова Г.А. Выделение и физико-химические характеристики пектина из нетрадиционного природного сырья. *Химия растительного сырья*. 2021;(4):75–82. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2021048412>
12. Тры А.В. Химическая характеристика пектина, выделенного из растительного сырья. *Приволжский научный вестник*. 2015;(2):8–10. <https://elibrary.ru/tjzhsv>
13. Мухамеджанова М.Ю., Филатова А.В., Джурабаев Д.Т., Тураев А.С. Процессы гелеобразования и реологические свойства умеренно-концентрированных водных растворов цитрусового пектина в присутствии ионов поливалентных металлов. *Химия растительного сырья*. 2012;(1):51–60. <https://elibrary.ru/pbwicv>
14. Хайтметова С.Б., Тураев А.С., Мухитдинов Б.И., Халилова Г.А. Выделение и физико-химические характеристики пектина из нетрадиционного природного сырья. *Химия растительного сырья*. 2021;(4):75–82. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2021048412>
15. Фарзалиев Э.Б. Оглы, Голубев В.Н., Цыганова Т.Б. Исследование и идентификация пектиновых веществ дикорастущих плодов облепихи (*Hippophae Rhamnoides* L.). *Хранение и переработка сельхозсырья*. 2021;(3):115–125. <https://doi.org/10.36107/spfp.2021.247>
16. Кварацхелия В.Н., Родионова Л.Я. Сравнительный анализ влияния низких температур на изменение аналитических характеристик пектиновых веществ извлеченных из альbedo цитрусовых плодов. *Политематический сетевой электронный научный журнал кубанского государственного аграрного университета*. 2014;(104):1832–1842. URL: <http://ej.kubagro.ru/archive.asp?u=2014> (дата обращения: 22.04.2025).
17. Кварацхелия В.Н., Родионова Л.Я. Действие отрицательных температур на качество пектиновых веществ плодов и ягод. *Политематический сетевой электронный научный журнал*

- журнал кубанского государственного аграрного университета. 2014;(104):1822–1831. URL: <http://ej.kubagro.ru/archive.asp?y=2014> (дата обращения: 22.04.2025).
18. Типсина Н.Н., Комарова О.Ю., Струпан Е.А. Технологические особенности пектинового сырьев. *Вестник КрасГАУ*. 2008;(1):253–259. <https://elibrary.ru/iirhmr>
 19. Силян В.Е. Исследование кинетики и обоснование технологических параметров процессов извлечения пектиновых веществ из выжимок красной смородины. *Вестник КрасГАУ*. 2015;(1):120–125. URL: <https://kgau.editorum.ru/ru/nauka/article/78702/view> (дата обращения: 26.04.2025).
 20. Ефремов А.А., Кондратьев Т.А. Выделение пектина из нетрадиционного растительного сырья и применение его в кондитерском производстве. *Химия растительного сырья*. 2008;(4):171–176. <https://elibrary.ru/kgbhzz>
 21. Мясищева Н.В., Артемова Е.Н., Макаркина М.А. Желирующая способность пектинов свежих и замороженных ягод красной смородины. *Техника и технология пищевых производств*. 2017;45(2):62–68. <https://elibrary.ru/zcoqgb>
 22. Едыгова С.Н., Хатко З.Н. Влияние параметров извлечения пектиновых веществ из выжимок айвы на показатели качества пектина. *Вестник Майкопского государственного технологического университета*. 2011;(4):50–53. <https://elibrary.ru/oopbhd>
 23. Зелепукин Ю.И., Зелепукин С.Ю., Федорук В.А., Бушмин И.С. К вопросу производства пектина из свекловичного жома. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. 2016;(2):238–242. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2016-2-238-242>
 24. Соболев И.В. Влияние вида и концентрации гидролизующего агента на кинетику извлечения пектиновых веществ из корзинок подсолнечника. *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2006;(22):91–96. URL: <http://ej.kubagro.ru/archive.asp?y=2006> (дата обращения: 28.04.2025).
 25. Ольховатов Е.А., Степовой А.В., Щербакова Е.В., Родионова Л.Я., Пивень М.М. Разработка способа получения пектинового экстракта из створки бобов сои. *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2016;(123):1579–1592. <https://doi.org/10.21515/1990-4665-123-107>
 26. Ольховатов Е.А., Родионова Л.Я., Щербакова Е.В. Разработка методики определения количества пектиновых веществ в сырье и продуктах его переработки. *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2017;(128):665–678. <https://doi.org/10.21515/1990-4665-128-049>
 27. Третьякова Н.Р., Тетенева А.Г., Зайко Г.М., Барашкина Е.В. Оптимизация технологических условий выделения пектина из растительного сырья. *Известия вузов. Пищевая технология*. 2011;(2-3):45–47. URL: <http://ivpt.ru/tocs/320-321/17/> (дата обращения: 28.04.2025).
 28. Тамова М.Ю., Барашкина Е.В., Журавлев Р.А., Третьякова Н.Р., Цыганкова С.С. Инновационные способы получения пектина из различных видов растительного сырья. *Новые технологии*. 2018;(4):79–84. URL: <https://newtechnology.mkgtu.ru/jour/article/view/178> (дата обращения: 30.04.2025).
 29. Сокол Н.В., Храмова Н.С., Гайдукова О.П. Исследование пектиновых веществ плодов дикорастущих культур. *Новые технологии*. 2008;(6):27–30. <https://elibrary.ru/jwccdl>
 30. Гербер Ю.Б., Калиновская Т.В., Гаврилов А.В., Киян Н.С. Исследование влияния режима гомогенизации на энергетические затраты и сроки хранения йогурта с добавлением порока кизила. *Инженерные технологии и системы*. 2024;34(4):615–628. <http://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.615-628>

REFERENCES

1. Zhidyokhina T.V., Popov A.S. Realization of Productivity Potential of Introduced Varieties of Cornelian Cherry Under Conditions of Tambov Region. *Fruit Growing and Viticulture of South Russia*. 2015;31(1):81–89. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <http://www.journalkubansad.ru/archive/31/> (accessed 15.04.2025).
2. Hasanova D.A. Cornelian Cherry as Medicinal Plant. *Biology and Integrative Medicine*. 2016;(4):45–54. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <http://integmed.uz/> (accessed 15.04.2025).

3. Try A.V., Miheeva L.A. [The Effect of Various Factors on the Yield of Pectin Substances Extracted From Plant Raw Materials]. *Regional geosystems*. 2014;(23):123–128. (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/thqxsv>
4. Mukhsiddin Z.K., Khalikov D.Kh., Abdusamiev F.T., Avloev Ch.Ch. Isolation and Structural Characterization of a Pectin Homo and Rhamnogalacturonan. *Talanta*. 2000;53(1):171–176. [http://doi.org/10.1016/S0039-9140\(00\)00456-2](http://doi.org/10.1016/S0039-9140(00)00456-2)
5. Kolotii T.B., Khatko Z.N. Analytical Characteristics of Pectin From Some Wild Fruits and Berries of the Foothill Zone of Adyghea. *New Technologies*. 2012;(3):30–32. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/pnqbsl>
6. Grabishin A.S. Some Features Of Pectin Production Technology. *New Technologies*. 2010;(2):30–34. (In Russ., abstract in Eng.) <https://www.elibrary.ru/mubfav>
7. Cuglenok N.V., Tipsina N.N., Katasanova O.Y. [Efficient Technologies for the Production of Pectin and its Use in the Food Industry]. *Bulletin of KSAU*. 2006;(10):331–334. (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/kxneof>
8. Kvarackheliya V.N., Rodionova L.Ya. Changing the Analytical Characteristics of Pectin Substances Apples Winter Ripening Under Long Influence of Low Temperatures. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2014;(100):1193–1203. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <http://ej.kubagro.ru/2014/06/pdf/> (accessed 20.04.2025).
9. Donchenko L.V., Edygoва S.N., Kolotii T.B., Arutiunova G.Yu. [Fractional Composition of Pectin Substances of Quince and Wild-Growing Raw Materials]. *Izvestiya vuzov. Pishchevaya tekhnologiya*. 2008;(2–3):118–119. (In Russ.) <https://elibrary.ru/jvypol>
10. Arutiunova G.Yu., Rodionova L.Ya., Stal'naya M.I. Jelly – and Complex Forming Properties of Cherry Plum Pectic Substances. *New Technologies*. 2009;(1):11–13. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/kfautf>
11. Khaymetova S.B., Turaev A.S., Muhitdinov B.I., Khalilova G.A. Isolation and Physicochemical Characterization of Pectin From Nonconventional Natu-Ral Raw Materials. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ya*. 2021;(4):75–82. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.14258/jcprm.2021048412>
12. Try A.V. Chemical Characteristics of Pectin Substances Extracted From Plant Materials. *Privolzhskij Nauchnyj Vestnik*. 2015;(2):8–10. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/tjzhsv>
13. Muhamedzhanova M.Yu., Filatova A.V., Dzhurabaev D.T., Turaev A.S. [Gelling Processes and Rheological Properties of Moderately Concentrated Aqueous Solutions of Citrus Pectin in the Presence of Polyvalent Metal Ions]. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ya*. 2012;(1):51–60. (In Russ.) <https://elibrary.ru/pbwicw>
14. Khaymetova S.B., Turaev A.S., Muhitdinov B.I., Khalilova G.A. Isolation and Physicochemical Characterization of Pectin From Nonconventional Natu-Ral Raw Materials. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ya*. 2021;(4):75–82. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.14258/jcprm.2021048412>
15. Farzaliyev E.B.O., Golubev V.N., Tsyganova T.B. Research and Identification of Pectin Substances of Wild Fruits of Sea Buckthorn (*Hippophae Rhamnoides L.*). *Storage and Processing of Farm Products*. 2021;(3):115–125. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.36107/spfp.2021.247>
16. Kvarackheliya V.N., Rodionova L.Ya. Comparison Analysis of the Influence of Low Temperature on the Change of the Analytical Characteristics of Pectin Extracted From the Albedo of Citrus Fruits. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2014;(104):1832–1842. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <http://ej.kubagro.ru/2014/10/pdf/> (accessed 22.04.2025).
17. Kvarackheliya V.N., Rodionova L.Ya. The Influence of Low Temperatures on the Quality of Pectinaceous Substances Fruits and Berries. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2014;(104):1822–1831. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <http://ej.kubagro.ru/2014/10/pdf/> (accessed 22.04.2025).
18. Tipsina N.N., Komarova O.Yu., Strupan E.A. [Technological Features of Pectin-Containing Raw Materials]. *Bulletin of KSAU*. 2008;(1):253–259. (In Russ.) <https://elibrary.ru/iirhmr>
19. Silin V.E. The Kinetics Study and the Technological Parameter Substantiation of the Process of the Pectic Substance Extraction from the Red Currant Residues. *Bulletin of KSAU*. 2015;(1):120–125. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://kgau.editorum.ru/ru/nauka/article/78702/view> (accessed 26.04.2025).

20. Efremov A.A., Kondratyuk T.A. Allocation of Pectines From Nonconventional Vegetative Raw Materials and its Application in Confectionery Production. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja*. 2008;(4):171–176. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/kgbhzz>
21. Myasishcheva N.V., Artemova E.N., Makarkina M.A. Jelly-Forming Ability of Pectins of Fresh and Frozen Red Currant Berries *Food Processing: Techniques and Technology*. 2017;45(2):62–68. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/zcoqgb>
22. Edygova S.N., Khatko Z.N. Effect of the Parameters of Extraction of Pectin Substances From Quince Marc on the Pectin Quality Indices. *Vestnik Majkopskogo Gosudarstvennogo Tekhnologicheskogo Universiteta*. 2011;(4):50–53. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/oopbhd>
23. Zelepukin Yu.I., Zelepukin S.Yu., Fedoruk V.A., Bushmin I.S. To the Question of Production of Pectin from Beet Pulp. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2016;(2):238–242. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2016-2-238-242>
24. Sobol' I.V. [Influence of Type and Concentration of Hydrolyzing Agent on the Kinetics of Extraction of Pectin Substances from Sunflower Baskets]. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2006;(22):91–96. (In Russ.) Available at: <http://ej.kubagro.ru/archive.asp?y=2006> (accessed 28.04.2025).
25. Olkhovатов E.A., Stepovoy A.V., Shcherbakova E.V., Rodionova L.Ya., Piven M.M. A Method for Producing Pectin Extract From Soybeans. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2016;(123):1579–1592. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.21515/1990-4665-123-107>
26. Olkhovатов E.A., Rodionova L.Ya., Shcherbakova E.V. Development of the Determination Methodology for Quantities of Pectin Substances in Raw Material and Products of its Processing. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2017;(128):665–678. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.21515/1990-4665-128-049>
27. Tretyakova N.R., Teteneva A.G., Zaiko G.M., Barashkina E.V. Optimization of Technological Conditions of Pectin From Plant Material. *Izvestiya vuzov. Pishchevaya tekhnologiya*. 2011;(2-3):45–47. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <http://ivpt.ru/tocs/320-321/17/> (accessed 28.04.2025).
28. Tamova M.Yu., Barashkina E.V., Zhuravlev R.A., Tretyakova N.R., Tsygankova S.S. Innovative Methods for Producing Pectin from Different Types of Plant Raw Materials. *New Technologies*. 2018;(4):79–84. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://newtechnology.mkgtu.ru/jour/article/view/178> (accessed 30.04.2025).
29. Sokol N.V., Hramova N.S., Gajdukova O.P. [Investigation of Pectin Substances in Fruits of Wild Crops]. *New Technologies*. 2008;(6):27–30. (In Russ.) <https://elibrary.ru/jwccdl>
30. Gerber Y.B., Kalinovskaya T.V., Gavrillov A.V., Kiyan N.S. Investigation of the Effect of the Homogenization Regime on Energy Costs and Shelf Life of Yogurt with Dogberry Puree. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(4):615–628. (In Russ., abstract in Eng.) <http://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.615-628>

Об авторах:

Гербер Юрий Борисович, доктор технических наук, профессор, заместитель директора Института «Агротехнологическая академия», заведующий кафедрой технологии и оборудования производства и переработки продукции животноводства Института «Агротехнологическая академия» Крымского федерального университета имени В. И Вернадского (295007, Российская Федерация, г. Симферополь, пр. Вернадского, д. 4), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3224-6833>, Researcher ID: В-6690-2019, gerber_1961@mail.ru

Калиновская Татьяна Витальевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии и оборудования производства и переработки продукции животноводства Института «Агротехнологическая академия» Крымского федерального университета имени В. И Вернадского (295007, Российская Федерация, г. Симферополь, пр. Вернадского, д. 4), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4421-7522>, kalinovskaya_88@mail.ru

Брановицкая Татьяна Юрьевна, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, доцент кафедры органической химии Института биохимических технологий, экологии и фармации Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского (295007, Российская Федерация, г. Симферополь, пр. Вернадского, д. 4), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5972-9291>, tat.br@mail.ru

Вклад авторов:

Ю. Б. Гербер – формулирование идеи исследования, целей и задач.

Т. В. Калиновская – создание и подготовка рукописи: критический анализ черновика рукописи, внесение замечаний и исправлений членами исследовательской группы, в том числе на этапах до и после публикации, осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов.

Т. Ю. Брановицкая – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 05.05.2025; поступила после рецензирования 17.06.2025;
принята к публикации 16.07.2025*

About the authors:

Yuriy B. Gerber, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Deputy Director of the Institute “Agrotechnological Academy”, Head of the Department of Technology and Equipment for the Production and Processing of Livestock Products of the Institute “Agrotechnological Academy”, V. I. Vernadsky Crimean Federal University (4 Vernadsky Ave., Simferopol 295007, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3224-6833>, Researcher ID: B-6690-2019, gerber_1961@mail.ru

Tatiana V. Kalinovskaya, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of Department of Technology and Equipment of Production and Processing of Products of Stock-Raising Institute “Agrotechnological Academy”, V. I. Vernadsky Crimean Federal University (4 Vernadsky Ave., Simferopol 295007, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4421-7522>, kalinovskaya_88@mail.ru

Tatiana Y. Branovitskaya, Cand.Sci. (Agric.), Associate Professor of the Department of Organic Chemistry, Institute of Biochemical Technologies, Ecology and Pharmacy, V. I. Vernadsky Crimean Federal University (4 Vernadsky Ave., Simferopol 295007, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5972-9291>, tat.br@mail.ru

Authors contribution:

Y. B. Gerber – formulating the study ideas, goals and aims.

T. V. Kalinovskaya – preparing the manuscript, critical analysis of the draft manuscript, of comments and corrections made by the members of the research group, including at pre- or post-publication stages, conducting the study, specifically performing the experiments.

T. Y. Branovitskaya – conducting the study, specifically performing the experiments.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 05.05.2025; revised 17.06.2025; accepted 16.07.2025

**ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ /
TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT**<https://doi.org/10.15507/2658-4123.036.202601.059-080>EDN: <https://elibrary.ru/myqsdp>

УДК / UDK 631.171

*Оригинальная статья / Original article***Повышение эффективности комбайновой
уборки картофеля: динамическое обоснование
параметров комкоразрушающего устройства****И. А. Успенский¹, Г. Г. Рамазанова²,
М. Ю. Костенко¹, П. И. Гаджиев²✉**¹ *Рязанский государственный агротехнологический
университет имени П. А. Костычева,**г. Рязань, Российская Федерация, <https://ror.org/05q4zgg93>*² *Российский государственный университет народного
хозяйства имени В. И. Вернадского,**г. Балашиха, Российская Федерация*✉ gulbike@yandex.ru*Аннотация*

Введение. Одной из ключевых продовольственных культур в мире является картофель. Однако его производство в регионах с тяжелыми, каменистыми и запыляющими почвами вызывает затруднения. Применение высокопроизводительных картофелеуборочных комбайнов на таких почвах крайне неэффективно и приводит к значительным потерям продовольствия и ресурсов. В условиях роста мирового населения необходимо создание научного обоснования для комкоразрушающего устройства, которое позволит на этапе подготовки почвы к посадке динамически разрушать прочные почвенные комки до состояния, при котором последующая комбайновая уборка станет эффективной.

Цель исследования. Теоретическое обоснование конструктивно-режимных параметров битерного барабана комкоразрушающего устройства машины и установление зависимости угла отклонения и предельного угла ножа от высоты почвенного пласта на элеваторе.

Материалы и методы. Исследование проводили на примере битера комкоразрушающего устройства. Ножи свободно вращались на осях битера. При движении сепарирующего элеватора за счет битера с ножами разрушались комки почвы, что привело к дроблению почвенных комков в несколько стадий. Методами теоретической механики и аналитической динамики выведены аналитические зависимости, связывающие параметры системы. Аналитические зависимости были промоделированы и визуализированы с использованием программного комплекса *Mathcad*. Анализ уравнений и графиков проводили методами аналитического и сравнительного анализа.

© Успенский И. А., Рамазанова Г. Г., Костенко М. Ю., Гаджиев П. И., 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. Изучено воздействие системы битер-нож на процесс разрушения почвенных комков в машинах для подготовки почвы под комбайновую уборку картофеля. Определены геометрические параметры системы битер-нож при взаимодействии с почвенным пластом, находящимся на элеваторе. Получены зависимости величины угла отклонения ножа от высоты пахотного слоя на элеваторе и при выходе из почвенного слоя. Рациональная длина ножа битера $l = 170$ мм, толщина – $\delta = 16$ мм.

Обсуждение и заключение. Результаты анализа динамики системы битер-нож при ее контакте с почвенной массой демонстрируют, что угол отклонения рабочего органа α является функцией от толщины обрабатываемого слоя на полотне элеватора, что соответствует уровню загрузки устройства. Помимо этого, на данную величину влияют такие параметры, как угол наклона пруткового элеватора и возникающая центробежная сила ножа. Полученные данные позволяют выявить динамику битерного барабана, необходимую для приведения тяжелых почв в рыхлое состояние при посадке картофеля, что может решить проблемы отделения клубней от почвенных комков при комбайновой уборке на тяжелых комковатых и засоренных камнями почвах.

Ключевые слова: комкоразрушающее устройство, битер-нож, предпосадочная подготовка, уборка картофеля, повреждение клубней, битерный барабан, разрушение комков почвы

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Успенский И.А., Рамазанова Г.Г., Костенко М.Ю., Гаджиев П.И. Повышение эффективности комбайновой уборки картофеля: динамическое обоснование параметров комкоразрушающего устройства. *Инженерные технологии и системы.* 2026;36(1):41–58. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.036.202601.041-058>

Improving the Efficiency of Combine-Harvesting Potatoes: Dynamic Substantiation of Soil Clod-Breaking Device Parameters

I. A. Uspenskiy^a, G. G. Ramazanova^b,
M. Y. Kostenko^a, P. I. Gadzhiev^b✉

^a Ryazan State Agrotechnological University

Named after P. A. Kostychev,

Ryazan, Russian Federation, <https://ror.org/05q4zgg93>

^b Vernadsky Russian State University of National Economy,
Balashikha, Russian Federation

✉ gulbike@yandex.ru

Abstract

Introduction. Potatoes are one of the world key food crops. But, harvesting potatoes in regions with heavy, rocky and waterlogged soils is difficult. Using high-performance potato harvesters on such soils is extremely ineffective and leads to significant losses of food and resource. The growing of global population causes the necessity to develop a scientific substantiation for creating soil clod-breaking device, which at the stage of preparing soil for planting will dynamically break up strong soil clods to a state allowing subsequent combine-harvesting to be effective and low-loss.

Aim of the Study. The study is aimed at substantiating theoretically the design and operating parameters of the beater drum of the clod-breaking device of the machine and determining the dependence of the deflection angle and limit angle of the knife on the height of the soil layer on the elevator.

Materials and Methods. The study was conducted using a clod-breaker beater as an example. The knives rotated freely on the beaters axes. When the cleaning elevator moved, the beater with knives broke up soil clods, resulting in the fragmentation of the soil clods in several stages. The methods of theoretical mechanics and analytical dynamics were used to find analytical dependences linking the system parameters. These analytical dependences were modeled and visualized using Mathcad software. The equations and graphs were analyzed using analytical and comparative analysis.

Results. There has been studied the impact of a beater-knife system on the breakdown of soil clods in soil machines to prepare the soil for combine-harvesting of potatoes. There have been determined the geometric parameters of the beater-knife system during interaction with the soil layer located in the elevator. There have been found the dependences of the knife deflection angle on the height of the arable layer in the elevator and when leaving the soil layer. There has been found that the optimal beater knife length is $l = 170$ mm, and the thickness is $\delta = 16$ mm.

Discussion and Conclusion. The results of analyzing the beater-knife system dynamics during its contact with the soil demonstrate that the working element deflection angle α depends on the thickness of the soil layer being processed on the elevator apron that corresponds to the machine load level. In addition, this value is influenced by such parameters as the elevator rod inclination angle and knife centrifugal force. The obtained data help determine the dynamics of the beater drum, which is necessary for breaking heavy soils during potato planting that make it possible to solve the problem of separating tubers from soil clods during combine-harvesting on heavy, cloddy, and stony soils.

Keywords: clod breaker, beater knife, pre-planting preparation, potato harvesting, tuber damage, beater drum, breaking up soil clods

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

For citation: Uspenskiy I.A., Ramazanova G.G., Kostenko M.Y., Gadzhiev P.I. Improving the Efficiency of Combine-Harvesting Potatoes: Dynamic Substantiation of Soil Clod-Breaking Device Parameters. *Engineering Technologies and Systems*. 2026;36(1):41–58. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.036.202601.041-058>

ВВЕДЕНИЕ

Процесс производства картофеля является энерго- и трудоемким, причем 75 % всех затрат приходится на уборочные работы. Уборка картофеля комбайнами позволяет сократить затраты труда на 20 %, снизить потери урожая почти в 3 раза [1–3]. Однако применение высокопроизводительных картофелеуборочных комбайнов на значительных площадях, особенно в регионах с тяжелыми суглинистыми, комковатыми и засоренными камнями почвами (например, во многих частях России, Восточной Европы, Азии), фактически невозможно. В технологическом процессе уборочных машин важную роль играет сепарация почвы, которая заключается в отделении почвы от твердых почвенных комков, в том числе камней [4–6]. Наличие неразрушенных почвенных комков существенно снижает сепарацию почвы, приводит к увеличению повреждений клубней, высоким потерям урожая (до 60 % и более от массы клубней составляют комки почвы и камни), резкому росту трудозатрат из-за необходимости ручной переборки, снижению рентабельности производства вследствие низкой производительности и высокого процента брака. Практика показывает, что качественная подготовка почвы – залог повышения эффективности функционирования картофелеуборочных машин [7–9].

Уборка картофеля представляет собой сложный и многогранный процесс, который требует применения новых постоянно совершенствующихся и адаптируемых к современным условиям способов. Существующие технологии подготовки почвы (например, сплошное фрезерование) ограничиваются рядом факторов: наличием

камней, структурой почвы и высокими энергозатратами [10–12]. Данные технологии неприменимы на каменистых почвах, так как не обеспечивают нужной степени рыхления для последующей качественной сепарации. Таким образом, сельхозпроизводители оказываются перед выбором: либо использовать ручной труд с низкой производительностью, либо нести огромные потери при механизированной уборке, либо вообще отказываться от выращивания картофеля на подобных землях.

В условиях роста мирового населения и необходимости интенсификации сельского хозяйства невозможность использовать плодородные, но «проблемные» почвы под высокотехнологичное производство картофеля становится глобальным вызовом. Это ограничивает потенциальные объемы производства, увеличивает себестоимость и ведет к перерасходу топлива, человеко-часов и самих клубней. Основной проблемой при комбайновой уборке картофеля, которую необходимо решить, является отделение клубней от примесей – почвенных комков и камней.

Эффективным решением является применение комкоразрушающего устройства машины для подготовки почвы к комбайновой уборке картофеля. Исследование направлено на прорыв в агроинженерии – создание научного обоснования для комкоразрушающего устройства, которое заблаговременно, на этапе подготовки почвы к посадке, сможет решить ключевую задачу: динамически разрушить прочные почвенные комки до состояния, при котором последующая комбайновая уборка станет эффективной.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В настоящее время отсутствуют эффективные технологии возделывания картофеля в тяжелых почвенно-климатических зонах, поскольку применяемый метод предварительной подготовки почвы требует разработки новых технических средств с активными комкоразрушающими устройствами.

Исследования технологических процессов разрушения почвенных комков ножами битерного барабана комкоразрушающего устройства проводятся отечественными и зарубежными учеными. Подчеркивается важность предварительной подготовки тяжелых почв к посадке и комбайновой уборке картофеля [13; 14]. Разрыхление почвы перед посадкой культуры способствует улучшению ее структуры: почва остается рыхлой вплоть до начала комбайновой уборки, что положительно сказывается на ее сепарации и приводит к уменьшению потерь и повреждения клубней.

Проведенный анализ показал, что, несмотря на имеющиеся технические средства для подготовки почвы под посадку и комбайновую уборку картофеля, у существующих моделей и технологий в зависимости от почвенно-климатических условий имеется ряд ограничений, не позволяющий полноценно их применять при возделывании картофеля. В связи с чем разработка машин с комкоразрушающими устройствами для возделывания картофеля на тяжелых почвах является перспективным направлением исследований.

Установлено, что наиболее благоприятные условия для применения картофелеуборочных комбайнов создаются путем предварительной подготовки почвы перед посадкой картофеля специализированной техникой. Для этого необходимо

усовершенствовать машины для подготовки почвы путем оснащения их комкоразрушающими устройствами [15–17].

При уборке картофеля картофелеуборочными комбайнами поддержание оптимального технологического процесса является основным фактором повышения производительности. В противном случае, эффективность работы комбайна снижается, в результате чего ухудшается качество сепарации почвы и увеличивается повреждение клубней. Это способствует потерям производства продукции агропромышленного комплекса. Неравномерность загрузки комбайна происходит из-за изменения физико-механических свойств и состава поступающей в комбайн массы, а также из-за неравномерности гребней. Резкое снижение эффективности сепарации наблюдается на тяжелых почвах, где имеются прочные комки, соизмеримые с клубнями. От качества предварительной подготовки почвы зависит решение вышеизложенной проблемы [18; 19].

На основании теории районирования и типажа картофелеуборочных комбайнов и машин профессора Г. Д. Петрова¹ предлагается при определении технологических комплексов машин для возделывания и уборки картофеля ориентировочно разделить почвенный слой на зоны, которые требуют предварительной подготовки.

При анализе существующих исследований отечественных ученых в данной области было выявлено несколько способов подготовки почвы, например, сплошное фрезерование или разрушение и отсеивание почвы от крупных прочных комков с применением машин для подготовки почвы² [20–22]. Появляются новые технологии сепарации картофеля, новые элементы сепарирующего рабочего органа при производстве картофелеуборочных машин, обеспечивающих качественную уборку урожая в определенных почвенно-климатических и лабораторных условиях [23–24]. Учеными из федерального научного агроинженерного центра ВИМ предлагается ресурсосберегающая технология уборки корнеплодов, способствующая качественной уборке урожая при влажности более 17% [25]. Недостатком данных технологий является сложность конструктивных решений при работе машин в полевых условиях, в связи с чем целесообразно продолжить исследования в данной области.

Для улучшения качества уборки картофеля, применительно к конкретным условиям, авторами предложено комкоразрушающее устройство машины для подготовки почвы к комбайновой уборке картофеля, которое обеспечивает разрушение комков почвы, двигающихся по элеватору машины, на более мелкие фракции по сравнению с известными техническими решениями [26]. Применение предложенного комкоразрушающего устройства способствует повышению эффективности уборки картофеля в тяжелых почвах. Для этого проведены дополнительные теоретические исследования движения почвенных комков и их взаимодействия с ножами битера для обоснования параметров комкоразрушающего устройства машины при комбайновой уборке картофеля.

¹ Петров Г.Д. Картофелеуборочные машины. М.: Машиностроение; 1984. 320 с.

² Гаджиев П.И., Рамазанова Г.Г. Комплекс машин для подготовки почвы к комбайновой уборке картофеля: учеб. пособие. М.: ООО «Изд-во «КноРус»; 2021. 134 с.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования

В качестве объекта исследования рассматривается комкоразрушающее устройство машины для подготовки почвы под посадку картофеля.

Методы исследования

В процессе проведения исследования применялся кинематический анализ сложного движения ножа (переносное вращение с битером и относительное вращение вокруг шарнира) с использованием теоремы о сложении скоростей. Для составления дифференциальных уравнений движения системы с двумя степенями свободы (обобщенные координаты: угол поворота битера φ и угол отклонения ножа α) использовался метод Лагранжа II рода. Метод применен в импульсной постановке для описания ударного взаимодействия. Для анализа ударных импульсов сил инерции и реакций в связях (шарнирах) при соударении ножа с почвенным комком применяли принцип Даламбера в импульсной форме.

На основе законов механики выведены аналитические зависимости, связывающие параметры системы: угол отклонения ножа при контакте с пластом, предельный угол ножа при выходе из пласта в радиальном положении, система уравнений, связывающая обобщенные скорости с ударными импульсами. Полученные зависимости реализованы в виде расчетных схем, наглядно демонстрирующих геометрию взаимодействия и приложенные силы.

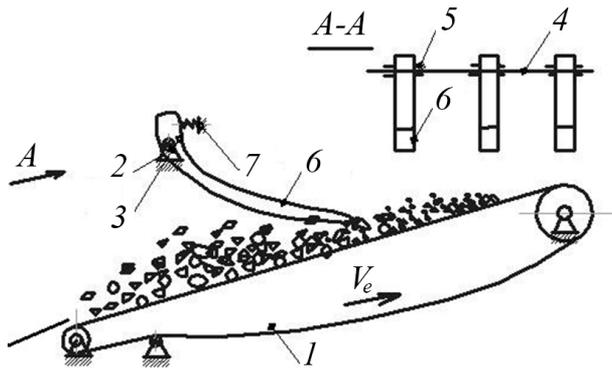
Аналитические зависимости были промоделированы и визуализированы с использованием программного комплекса *Mathcad*. Компьютерный анализ позволил качественно и количественно оценить характер влияния ключевого параметра h на рабочий процесс.

С целью выявления определяющих факторов (высота пласта, центробежная сила, угол наклона элеватора) проведен аналитический и сравнительный анализ полученных уравнений и графиков

Таким образом, методология исследования представляет собой последовательное применение методов аналитической динамики, теоретической механики и компьютерного моделирования для перехода от физической постановки агроинженерной задачи к количественным инженерным рекомендациям по проектированию комкоразрушающего устройства.

Оборудование и процедура исследования

На рисунке 1 схематически изображено комкоразрушающее устройство машины для подготовки почвы к комбайновой уборке картофеля, которое состоит из сепарирующего элеватора 1, качающихся подпружиненных сферической формы ножей 6, поочередно размещенных на вращающейся ступенчатой полой оси с подшипниковыми цилиндрическими втулками 5. Ножи выполнены с возможностью возвращения в первоначальное положение за счет цилиндрической винтовой пружины сжатия 7 [24].



Р и с. 1. Схема комкоразрушающего устройства машины для подготовки почвы к комбайновой уборке:

1 – сепарирующий элеватор; 2 – комкоразрушающий барабан; 3 – шарниры; 4 – ступенчатая полая ось; 5 – подшипниковые цилиндрические втулки; 6 – качающиеся подпружиненные сферические ножи; 7 – цилиндрическая винтовая пружина сжатия

F i g. 1. Scheme of the clod-breaking device of the machine for soil preparation for combine harvesting:

1 – cleaning elevator; 2 – clod-breaking drum; 3 – hinges; 4 – stepped hollow axle; 5 – cylindrical bearing bushings; 6 – swinging spring-loaded spherical knives; 7 – cylindrical helical compression spring

Примечание: A – вид спереди; A-A – разрез вида спереди; V_e – скорость элеватора.
Note: A – front view; A-A – sectional front view; V_e – elevator speed.

Источник: рисунок 1 взят из [26].
Source: figure 1 was taken from [26].

Подкапывающий лемех 8 подрезает почвенный пласт при вращении сепарирующего элеватора 1, крупные комки почвы движутся к комкоразрушающему барабану 2, закрепленному на шарнирах 3. При взаимодействии с качающимися подпружиненными сферическими ножами 6, поочередно размещенными на вращающейся ступенчатой полой оси 4, с подшипниковыми цилиндрическими втулками 5 крупные части почвы начинают дробиться. При дальнейшем вращении сепарирующего элеватора 1 ножи прижимаются за счет цилиндрической винтовой пружины сжатия 7, средние комки почвы разрушаются. Дробление почвенных комков происходит в несколько стадий.

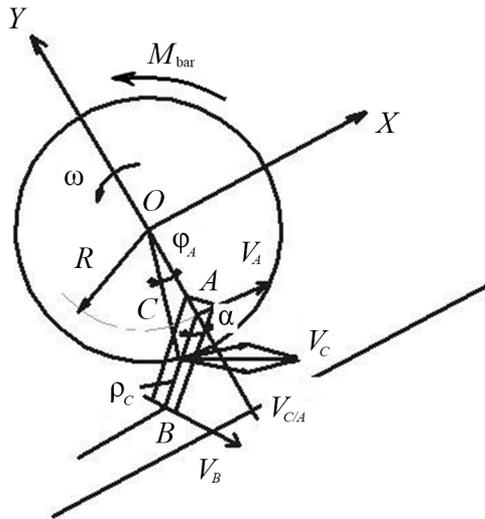
Контакт лезвия с комком почвы происходит за счет удара, возникающего в результате возвращения предварительно растянутой пружины в исходное положение. Сферическая форма лезвия увеличивает время и площадь контакта с комком в процессе работы. Предложенная конструкция комкоразрушающего устройства при подготовке почвы для уборки картофеля обеспечивает измельчение комков почвы, перемещающихся через элеватор машины, на более мелкие фракции, чем при использовании традиционных решений.

Для изучения этого вопроса составили дифференциальное уравнение движения системы, состоящей из ротора и режущего элемента, используя метод Лагранжа. Выбрали фиксированную систему координат XOY , проходящую через центр вращения ротора, и подвижную систему координат X_1OY_1 , вращающуюся

вместе с ротором и проходящую через центр вращения ротора и ось подвеса режущего элемента.

Битерный барабан (рис. 2) представляет собой систему из вращающегося ротора с шарнирно закрепленными ножами. Система имеет две степени свободы. К системе приложен вращающий момент M_{bar} . Нож при взаимодействии с почвенным пластом отклоняется на угол α .

Ввели следующие допущения: силами трения в шарнирах и весом ножа пренебрегали в виду их малого значения в сравнении с центробежной силой ножа. В качестве обобщенных координат системы приняли угол отклонения битера от вертикали и угол отклонения ножа от первоначального положения.



Р и с. 2. Расчетная схема к исследованию динамики битерного барабана

F i g. 2. Analytic model for the study of the dynamics of a beater drum

Примечание: Y – ось ординат; X – ось абсцисс; M_{bar} – вращающий момент барабана; R – радиус подвеса ножей на битере; ω – угловая скорость битера; φ_A – угол отклонения битера; C – центр тяжести ножа; A – точка крепления ножа к барабану; B – точка соприкосновения ножа с почвой; α – угол отклонения ножа; V_A – переносная (окружная) скорость точки A вместе с битером; V_C – абсолютная скорость центра тяжести ножа; V_{CA} – относительная скорость точки C относительно точки A ; V_B – абсолютная скорость точки B ножа; ρ_C – расстояние от оси подвеса до центра тяжести ножа.

Note: Y – ordinate axis; X – abscissa axis; M_{bar} – drum torque; R – blade suspension radius on beater; ω – beater angular velocity; φ_A – beater deflection angle; C – blade center of gravity; A – blade attachment point to drum; B – blade contact point with soil; α – blade deflection angle; V_A – transfer (circumferential) velocity of point A together with beater; V_C – absolute velocity of blade center of gravity; V_{CA} – relative velocity of point C , relative to point A ; V_B – absolute velocity of blade point B ; ρ_C – distance from suspension axis to blade center of gravity.

Источник: рисунки 2–5 составлены авторами статьи в программе Компас 14.

Source: figures 2–5 are compiled by the program Compass 14.

Уравнения Лагранжа второго рода в обобщенных координатах для удара записали в виде:

$$\Delta \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\phi}} \right) = Q_{\phi}^s,$$

$$\Delta \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}} \right) = Q_{\alpha}^s,$$

где Δ – оператор Лапласа; T – кинетическая энергия системы: битев и нож, Дж; $\dot{\phi}$ – угол поворота битева, °; $\dot{\alpha}$ – угол отклонения ножа, °; Q_1 и Q_2 – обобщенные силы, Н.

Определили обобщенные угловые скорости системы. Угловая скорость битева $\omega_1 = \dot{\phi}$, угловая скорость ножа $\omega_2 = \omega_{2/1} - \omega_1$, где $\omega_{2/1}$ – угловая скорость ножа относительно битева. Так как угловые скорости направлены вдоль одной оси, уравнения записаны не в векторном, а скалярном виде. Относительная угловая скорость ножа $\omega_1 = \dot{\alpha}$ при ударе направлена в противоположную сторону, тогда угловую скорость ножа записали в виде $\omega_2 = \dot{\phi} - \dot{\alpha}$.

Кинетическую энергию T системы битев-нож определили выражением:

$$T = T_1 + T_2,$$

где T_1 – кинетическая энергия битева, Дж; T_2 – кинетическая энергия ножа, Дж.

Кинетическая энергия битева T_1 , вращающегося вокруг неподвижной оси, определили выражением:

$$T_1 = I \cdot \frac{\omega_1^2}{2},$$

где I – момент инерции битева, $I = \frac{1}{2} MR^2$, кг · м²; M – масса битева, кг; $\omega_1 = \dot{\phi}$ – угловая скорость битева, рад/с.

Так как нож совершает плоскопараллельное движение, то его кинетическую энергию определили выражением:

$$T_2 = \frac{1}{2} mV_c^2 + \frac{1}{2} I_A \omega_2^2,$$

где V_c – абсолютная скорость центра тяжести ножа, м/с; m – масса ножа, кг; I_A – момент инерции ножа относительно его центра его вращения, кг · м²; $\omega_2 = \dot{\phi} - \dot{\alpha}$ – угловая скорость ножа, рад/с.

$$I_A = \frac{ml^2}{3} = \frac{m(2\rho_c)^2}{3} = \frac{4m\rho_c^2}{3},$$

где l – длина ножа, м; ρ_c – расстояние от оси подвеса до центра тяжести ножа, м.

Абсолютную скорость центра тяжести ножа \bar{V}_c определили выражением:

$$\bar{V}_c = \bar{V}_A + \bar{V}_{c/A}, \quad (1)$$

где \bar{V}_A – переносная (окружная) скорость точки A вместе с битевом, м/с; $\bar{V}_{c/A}$ – относительная скорость точки C , относительно точки A , м/с.

Переносную скорость точки A определили выражением:

$$\bar{V}_A = \bar{\omega}_1 \bar{R}, \quad (2)$$

где \bar{R} – радиус подвеса ножей на битере, м.

Относительная скорость $\bar{V}_{c/A}$ движения ножа относительно битера:

$$\bar{V}_{c/A} = \bar{\omega}_2 \cdot \bar{\rho}_c, \quad (3)$$

Подставили в выражение (1) уравнения (2) и (3):

$$\bar{V}_c = \bar{\omega}_1 \bar{R} + \bar{\omega}_2 \cdot \bar{\rho}_c,$$

Полную скорость центра тяжести ножа с учетом теоремы косинусов определили выражением

$$V_c^2 = \dot{\varphi}^2 R^2 + (\dot{\varphi} - \dot{\alpha})^2 \rho_c^2 - 2\dot{\varphi}\dot{\alpha}R\rho_c \cos(\alpha - \varphi_1). \quad (4)$$

Раскрыв скобки в выражении (4), получили:

$$V_c^2 = \dot{\varphi}^2 R^2 + \dot{\varphi}^2 \rho_c^2 + \dot{\alpha}^2 \rho_c^2 - 2\dot{\varphi}\dot{\alpha}\rho_c^2 - 2\dot{\varphi}\dot{\alpha}R\rho_c \cos(\alpha - \varphi_1).$$

Величину угла φ_1 определили размерами битера с ножами и углом отклонения α

$$\cos \varphi_1 = \frac{R + \rho_c \cos \alpha}{\sqrt{R^2 + \rho_c^2 + R\rho_c \cos \alpha}},$$
$$\sin \varphi_1 = \frac{\rho_c \sin \alpha}{\sqrt{R^2 + \rho_c^2 + R\rho_c \cos \alpha}}.$$

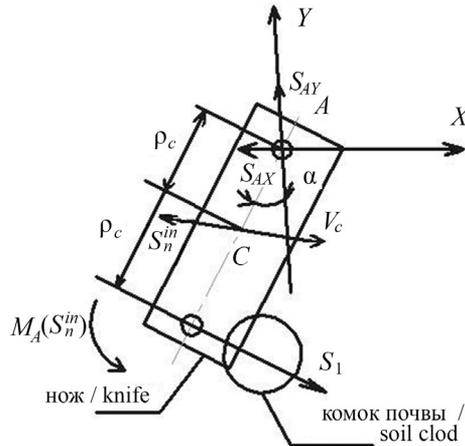
Тогда кинетическую энергию системы определили выражением:

$$T = \frac{1}{4} M \dot{\varphi}^2 R^2 + \frac{1}{2} m (\dot{\varphi}^2 R^2 + \dot{\varphi}^2 \rho_c^2 + \dot{\alpha}^2 \rho_c^2 - 2\dot{\varphi}\dot{\alpha}\rho_c^2 + 2\dot{\varphi}\dot{\alpha}R\rho_c \cos(\alpha - \varphi_1)) + \frac{2}{3} m \rho_c^2 (\dot{\varphi} - \dot{\alpha})^2.$$

Вычислили частные производные от кинетической энергии по обобщенным скоростям:

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} = \frac{1}{2} M \dot{\varphi} R^2 + \frac{1}{2} m (2\dot{\varphi} R^2 + 2\dot{\varphi} \rho_c^2 - 2\dot{\alpha} \rho_c^2 + 2\dot{\alpha} R \rho_c \cos(\alpha - \varphi_1)) + \frac{4}{3} m \rho_c^2 (\dot{\varphi} - \dot{\alpha}),$$
$$\frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}} = \frac{1}{2} m (2\dot{\alpha} \rho_c^2 - 2\dot{\varphi} \rho_c^2 + 2\dot{\varphi} R \rho_c \cos(\alpha - \varphi_1)) - \frac{4}{3} m \rho_c^2 (\dot{\varphi} - \dot{\alpha}).$$

Определили обобщенные ударные импульсы системы битер-нож, соответствующие обобщенным координатам. Рассмотрели отдельно удар ножа о комок почвы и ударное взаимодействие ножа с битером. Нож при ударном взаимодействии с комком почвы совершал плоскопараллельное движение (рис. 3).



Р и с. 3. Расчетная схема к исследованию ударного взаимодействия ножа с комком почвы

F i g. 3. Analytic model for the study of the impact interaction of a knife with a lump of soil

Примечание: S_{Ay} – ударный импульс реакции связи по оси O_y ; S_{Ax} – ударный импульс реакции связи по оси O_x ; S_n^{in} – ударный импульс сил инерции; S_1 – ударный импульс по комку почвы; V_c – абсолютная скорость.

Note: S_{Ay} – shock impulse of the reaction of the bond along the O_y -axis; S_{Ax} – shock impulse of the reaction of the bond along the O_x -axis; S_n^{in} – shock impulse of inertial forces; S_1 – impact pulse on a soil clod; V_c – absolute speed.

На нож, совершающий плоскопараллельное движение, на основании принципа Даламбера действуют ударный импульс сил инерции S_n^{in} и момент ударного импульса $M_A(S_n^{in})$ сил инерции относительно точки A .

$$S_n^{in} = m(V_c - V_c'),$$

$$M_A(S_n^{in}) = I_c(\omega_{21} - \omega_{21}'),$$

где V_c и V_c' – абсолютные скорости центра тяжести C ножа до и после удара, м/с; ω_{21} , ω_{21}' – угловые скорости ножа до и после удара ($\omega_{21} = \alpha$), рад/с.

По определению коэффициент восстановления при ударе комка и нож (материал ножа) в этом случае равен $k = -\frac{V_c'}{-V_c}$, тогда угловая скорость после удара определили выражением $\omega_{21}' = k\omega_{21}$.

Ударный импульс сил инерции S_n^{in} направлен в противоположную сторону абсолютной скорости V_c . В результате ударного взаимодействия ножа и комка в шарнире A возникли ударные импульсы реакции связи S_{Ax} и S_{Ay} .

Составили уравнения механической системы с учетом принципа Даламбера

$$\begin{cases} S_{Ax} - S_1 \cos \alpha + S_n^{in} \cos(\alpha - \varphi_1) = 0 \\ S_{Ay} - S_1 \sin \alpha + S_n^{in} \sin(\alpha - \varphi_1) = 0 \\ S_1 2\rho_c + M_A(S_n^{in}) + S_n^{in} \cos(\alpha - \varphi_1) \rho_c = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Выразили величину ударного импульса сил инерции S_n^{in} из выражения (5)

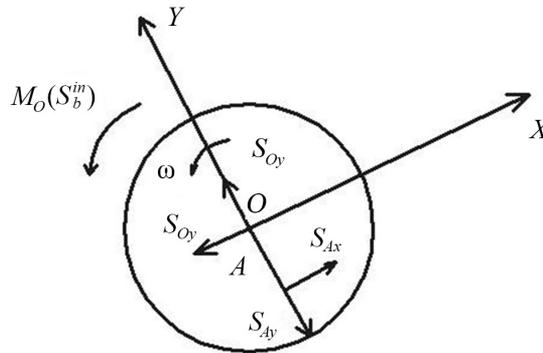
$$S_n^{in} = \frac{S_1 2\rho_c + M_A (S_n^{in})}{\rho_c \cos(\alpha - \varphi_1)}.$$

Тогда ударные импульсы реакции связи S_{Ax} и S_{Ay} определили выражениями

$$S_{Ax} = S_1 \cos \alpha - 2S_1 - \frac{M_A (S_n^{in})}{\rho_c},$$

$$S_{Ay} = -S_1 \sin \alpha + \frac{S_1 2\rho_c + M_A (S_n^{in})}{\rho_c \cos(\alpha - \varphi_1)} \sin(\alpha - \varphi_1).$$

Определили обобщенные ударные импульсы подшипников битера S_{Ox} , S_{Oy} и момент ударного импульса сил инерции битера относительно точки $OM_O (S_b^{in})$ (рис. 4).



Р и с. 4. Расчетная схема к исследованию ударного взаимодействия ножа с битером

F i g. 4. Analytic model for the study of impact interaction of a knife with a beater

Примечание: $M_O (S_b^{in})$ – момент ударного импульса сил инерции битера относительно точки O .

Note: $M_O (S_b^{in})$ – the moment of the impact impulse of the inertial forces of the beater relative to point O .

Составили уравнения механической системы с учетом принципа Даламбера

$$\begin{cases} S_{Ox} - S_{Ax} = 0 \\ S_{Oy} - S_{Ay} = 0 \\ M_O (S_n^{in}) - S_{Ax} R = 0. \end{cases}$$

Обобщенные ударные импульсы подшипников битера определили следующим выражением

$$S_{Ax} = S_1 \cos \alpha - 2S_1 - \frac{M_A (S_n^{in})}{\rho_c},$$

$$S_{Ay} = -S_1 \sin \alpha + \frac{S_1 2\rho_c + M_A (S_n^{in})}{\rho_c \cos(\alpha - \varphi_1)} \sin(\alpha - \varphi_1).$$

Момент ударного импульса сил инерции бitera $M_O(S_b^{in})$ относительно точки O определили выражением

$$M_O(S_b^{in}) = S_{Ax}R = S_1R(\cos \alpha - 2) + \frac{M_A(S_n^{in})R}{\rho_c}.$$

Вычислили обобщенные ударные импульсы как частное виртуальной работы ударного импульса на соответствующее виртуальное перемещение.

$$Q_\varphi^S = \left. \frac{\delta A^S}{\delta \varphi} \right|_{\delta \varphi=0} = \frac{S_1R\delta\varphi(\cos \alpha) - (S_n^{in} \cos(\alpha - \varphi_1))R\delta\varphi}{\delta\varphi},$$

$$Q_\alpha^S = \left. \frac{\delta A^S}{\delta \alpha} \right|_{\delta \alpha=0} = \frac{-(S_12 + S_n^{in} \cos(\alpha - \varphi_1))\rho_c \delta\alpha}{\delta\alpha}.$$

Упростив, имеем

$$Q_\varphi^S = S_1R(\cos \alpha) - (S_n^{in} \cos(\alpha - \varphi_1))R,$$

$$Q_\alpha^S = -(S_12 + S_n^{in} \cos(\alpha - \varphi_1))\rho_c.$$

Для рассматриваемой механической системы бitera-нож с двумя степенями свободы уравнения Лагранжа при ударе запишем в обобщенном виде

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} = \frac{1}{2}M\dot{\varphi}R^2 + \frac{1}{2}m(2\dot{\varphi}R^2 + 2\dot{\varphi}\rho_c^2 - 2\dot{\alpha}\rho_c^2 - 2\dot{\alpha}R\rho_c \cos(\alpha - \varphi_1)) +$$

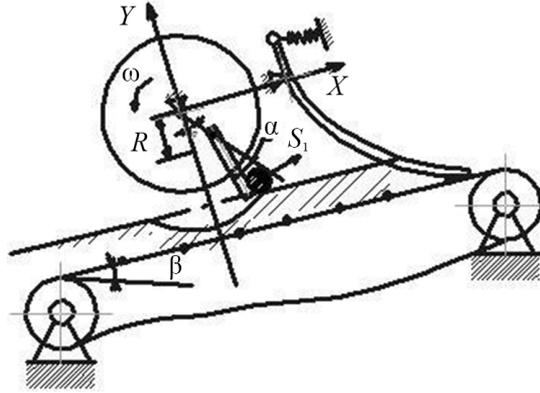
$$+ \frac{4}{3}m\rho_c^2(\dot{\varphi} - \dot{\alpha}) = S_1R(\cos \alpha) - (S_n^{in} \cos(\alpha - \varphi_1))R$$

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}} = \frac{1}{2}m(2\dot{\alpha}\rho_c^2 - 2\dot{\varphi}\rho_c^2 - 2\dot{\varphi}R\rho_c \cos(\alpha - \varphi_1)) -$$

$$- \frac{4}{3}m\rho_c^2(\dot{\varphi} - \dot{\alpha}) = -(S_12 + S_n^{in} \cos(\alpha - \varphi_1))\rho_c.$$

Полученное уравнение для механической системы бitera-нож с двумя степенями свободы позволяет установить зависимости между параметрами системы: масса, размеры, углы поворота звеньев с изменением кинетической энергии при воздействии на почвенный пласт.

Проанализировав движение после соударения с ножом бitera, рассмотрели движение комка. На рисунке 5 показана расчетная схема удара ножа по комку почвы. Так как система бitera-нож представляет собой двойной маятник, то движение ножа очень сложно спрогнозировать, поэтому изучили случаи, в которых угол соударения ножа с почвенным комком происходит под определенным углом, обеспечивающим полет комка вверх относительно полотна сепарирующего элеватора.



Р и с. 5. Расчетная схема к исследованию удара ножа по комку почвы
 F i g. 5. Analytic model for the study of the impact of a knife on a soil clod

Примечание: β – угол наклона элеватора.
 Note: β – elevator inclination angle.

Рассмотрели геометрические параметры системы битер-нож при взаимодействии почвенным пластом, находящимся на элеваторе. Расстояние от центра битера до элеватора представили выражением

$$R + 2\rho_c + \Delta = R + 2\rho_c \cos \alpha + h,$$

где R – радиус подвеса ножей на битере, м; l – длина ножа, ($l = 2\rho_c$), м; ρ_c – расстояние от оси подвеса до центра тяжести ножа, м; h – высота почвенного пласта на элеваторе, м; Δ – величина зазора между ножом и элеватором, м.

Упростив выражение, выразили величину отклонения ножа при соприкосновении с почвенным пластом

$$\cos \alpha = 1 - \frac{h - \Delta}{l}.$$

Величину угла отклонения ножа при соприкосновении с почвенным слоем определили выражением

$$\alpha = \arccos \left(1 - \frac{h - \Delta}{l} \right). \quad (6)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Учитывая полученные выражения, рассчитали отклонение ножа битера при взаимодействии с почвенными комками. Построили зависимость отклонения ножа при соприкосновении с почвенным пластом (рис. 6) в программе *Mathcad 16*.

Анализ рисунка 6 показал, что отклонение ножа при соприкосновении с почвенным пластом определяется его толщиной на элеваторе – загрузкой комкоразрушающего устройства. Также на величину отклонения оказывает угол наклона пруткового элеватора и величина центробежной силы ножа.



Р и с. 6. Зависимость угла максимального отклонения ножа от высоты почвенного пласта на элеваторе

F i g. 6. Dependence of the limit knife deflection angle on the height of the soil layer in the elevator

Примечание: $\alpha(h)$ – угол максимального отклонения ножа; h – высота почвенного пласта на элеваторе.

Note: $\alpha(h)$ – limit knife deflection angle; h – height of the soil layer at the elevator.

Источник: графики для рисунков 6, 7 составлены авторами статьи в программе *Mathcad 16*.

Source: the graphs for figures 6 and 7 were compiled by the authors of the article using the *Mathcad* program 16.

Рассмотрели предельный случай при высокой частоте вращения битера, когда нож под действием центробежной силы расположен радиально. Геометрические параметры системы битер-нож при взаимодействии пахотным слоем представили выражением

$$R + l + \Delta = (R + l) \cos \varphi_2 + h.$$

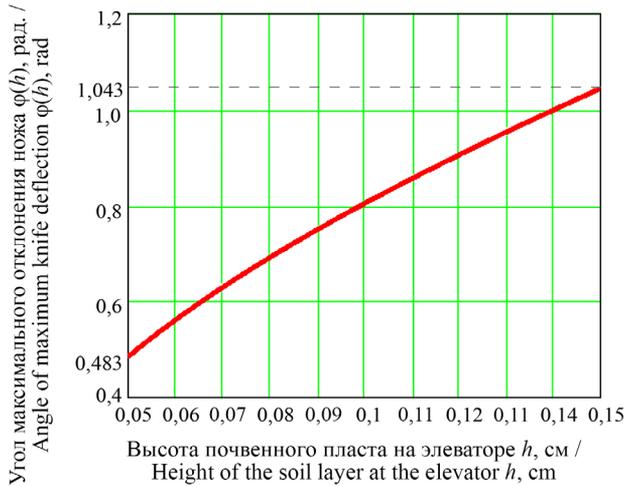
Упростив выражение, выразили величину предельного угла ножа при выходе из почвенного пласта

$$\cos \varphi_2 = \frac{R + l + \Delta - h}{R + l}. \quad (7)$$

Построили их зависимость (рис. 7).

Разработана динамическая модель системы «битер – нож» как двухстепенного двойного маятника с учетом ударного взаимодействия с почвенным пластом. На основе уравнений Лагранжа второго рода получены уравнения движения, описывающие изменение обобщенных координат (угла поворота битера и угла отклонения ножа) при ударе о почвенный комок.

Установлена количественная зависимость угла отклонения ножа α от параметров системы и условий работы. Показано, что угол отклонения определяется, прежде всего, высотой почвенного пласта на элеваторе h , т. е. загрузкой устройства, а также геометрическими параметрами ножа (длиной l и положением центра масс ρ_c) и величиной зазора Δ .



Р и с. 7. Зависимость величины предельного угла ножа от высоты почвенного пласта на элеваторе

F i g. 7. Dependence of the value of the maximum angle of the knife on the height of the soil layer on the elevator

Примечание: $\varphi(h)$ – предельный угол отклонения ножа.

Note: $\varphi(h)$ – limit knife deflection angle.

Получена и проанализирована зависимость предельного угла отклонения ножа φ^2 от высоты почвенного пласта для случая, когда нож под действием центробежной силы занимает радиальное положение. Эта зависимость имеет важное значение для определения максимально допустимой нагрузки на устройство без потери контакта ножа с комком.

На основе построенных в среде *Mathcad* графических зависимостей установлено, что ключевым фактором, управляющим процессом разрушения, является толщина обрабатываемого слоя почвы. Угол наклона элеватора и величина центробежной силы ножа выступают дополнительными регулируемыми параметрами, позволяющими оптимизировать процесс ударного воздействия для различных типов почв.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Степень разрушения комков почвы ударным барабаном зависит от физических и механических свойств почвы: влажности, плотности и размера (массы) комков.

После удара по комку почвы нож барабана расходует часть своей кинетической энергии, и его угловая скорость в абсолютном направлении становится равной нулю. Это означает, что ударный барабан будет отклоняться от своего радиального положения в направлении, противоположном вращению барабана до тех пор, пока под действием центробежных инерционных сил его скорость не станет равной нулю. Тогда его угловая скорость в абсолютном направлении будет равна скорости барабана.

Почвенный комок не вполне упругое тело, его коэффициент восстановления при ударе зависит от угловой скорости бitera и скорости комка до и после удара, которая влияет на величину ударного импульса.

Для сухих твердых почв значение коэффициента k не превышает 0,4. Для почв влажностью до 20 % $k = 0,2 \dots 0,3^3$.

Решение уравнений (6) и (7) в виде графиков зависимости угла отклонения и предельного угла ножа от высоты почвенного пласта позволяет сделать следующие выводы: при толщине $h = 5$ см почвенного пласта, поступающего на элеватор, нож бitera отклоняется на угол $\alpha = 43^\circ$, а при $h = 10$ см угол $\alpha = 68^\circ$.

Так же при толщине $h = 5$ см почвенного пласта предельный угол ножа бitera составляет $\alpha = 29^\circ$, а при $h = 10$ см предельный угол принимает значение $\alpha = 46^\circ$. Эти же данные подтверждаются и по результатам экспериментальных исследований.

По расчетам проведенных исследований получено, что рациональная длина ножа бitera $l = 170$ мм, толщина принимается $\delta = 16$ мм, что может быть использовано при проектировании новых конструкций комкоразрушающего устройства машин для подготовки почвы с учетом рекомендуемых параметров и режимов работы комкоразрушающего рабочего органа.

Полученные аналитические зависимости и модель представляют собой научную основу для инженерного расчета и проектирования комкоразрушающих устройств нового поколения. Они позволяют обоснованно выбирать рациональные геометрические (радиус барабана R , длина ножа l) и режимные (частота вращения, зазор Δ) параметры для конкретных почвенно-климатических условий.

Реализация предложенных решений на практике позволит кардинально повысить эффективность предпосадочной подготовки тяжелых комковатых почв. Это создаст необходимое условие для успешного применения высокопроизводительных картофелеуборочных комбайнов, что в итоге приведет к снижению примесей в ворохе до минимального уровня, уменьшению механического повреждения клубней, значительному росту производительности уборочных работ и снижению трудо- и энергозатрат.

Таким образом, результаты исследований вносят конкретный вклад в решение глобальной проблемы механизации уборки картофеля на сложных почвах и открывают путь к созданию ресурсосберегающих технологий, обеспечивающих продовольственную безопасность и экономическую устойчивость картофелеводства в регионах с неблагоприятными почвенными условиями.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Дорохов А.С., Сибирёв А.В., Аксенов А.Г., Мосяков М.А., Сазонов М.В. Основы разработки автоматизированных машин для возделывания, уборки и послеуборочной обработки овощных культур и картофеля с цифровыми системами управления. *Инженерные технологии и системы*. 2022;32(1):145–173. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202201.145-173>
2. Гаджиев П.И., Рамазанова Г.Г., Гаджиев И.П. Разработка ресурсосберегающей технологии и технических средств для возделывания картофеля. *Наука в центральной России*. 2024;1(67):110–117. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-1-110-117>
3. Аксенов А.Г., Трунов М.С., Петухов С.Н. Обоснование концепции создания роботизированного комплекса для повышения эффективности фитосанитарных работ в семенных посадках картофеля. *Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П. А. Костычева*. 2023;15(4):96–105. <https://doi.org/10.36508/RSATU.2023.74.49.013>

³ Гаджиев П.И., Рамазанова Г.Г. Комплекс машин для подготовки почвы к комбайновой уборке картофеля.

4. Молоканова Л.О., Рембалович Г.К., Костенко М.Ю., Шемякин А.В., Желтоухов А.А. Динамика воздействия активного встряхивателя элеватора на компоненты картофельного вороха. *Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П. А. Костычева*. 2025;17(1):143–150. <https://doi.org/10.36508/RSATU.2025.72.56.020>
5. Колчин Н.Н., Пономарев А.Г., Петухов С.Н. Как снизить повреждение клубней в машинных технологиях. *Картофель и овощи*. 2019;(3):14–16. <https://doi.org/10.25630/PAV.2019.48.28.002>
6. Лапин Д.А., Волченков Д.А., Гришин И.И., Нефедов Б.А. Теоретические исследования траекторий движения компонентов картофельного вороха на прутковом элеваторе уборочной машины при работе дисковых интенсификаторов. *Международный научный журнал*. 2017;(6):107–112. URL: <https://www.mmegapolis.ru/2017-1/134-vypusk-6.html> (дата обращения: 15.06.2025).
7. Lü J., Shang Q., Yang Y., Li Z., Li J., Liu Z. Design Optimization and Experiment on Potato Haulm Cutter. *Transactions of the CSAM*. 2016;47(5):106–114. <https://doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.015>
8. Starovoitov S.I., Grin A.M. Plough Hull for Precision Tillage. In: XV International Scientific Conference «Interagromash 2022». Rostov-na-Donu: Springer Nature Switzerland (Zug); 2023. p. 425–432. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-21432-5>
9. Dongre A.U., Battase R., Dudhale S., Patil V.R., Chavan D. Development of Potato Harvesting Model. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2017;4(10):1567–1570. URL: <https://www.irjet.net/volume4-issue10> (дата обращения: 25.05.2025).
10. Старовойтов С.И., Чемисов Н.Н. К определению модуля упругости почвы. *Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет им. В. П. Горячкина»*. 2011;(1):39–41. <https://www.elibrary.ru/rassxd>
11. Старовойтова О.А., Старовойтов В.И., Манохина А.А., Духанина С.М. Физико-механические параметры почвы при выращивании картофеля на грядах. *Земледелие*. 2018;(5):16–20. <https://doi.org/10.24411/0044-3913-2018-10504>
12. Старовойтов С.И., Старовойтова Н.П., Чемисов Н.Н. О крошении суглинистой почвы. *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2014;(3):30–34. <https://www.elibrary.ru/siwanx>
13. Mak J., Chen Y., Sadek M.A. Determining Parameters of a Discrete Element Model for Soil-Tool Interaction. *Soil and Tillage Research*. 2012;(118):117–122. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.10.019>
14. Obermayr M., Dressler K., Vrettos C., Eberhard P. Prediction of Draft Forces in Cohesionless Soil with the Discrete Element Method. *Journal of Terramechanics*. 2011;48(5):347–358. <https://doi.org/10.1016/J.JTERRA.2011.08.003>
15. Пшеченков К.А., Мальцев С.В., Смирнов А.В. Технология комбайновой уборки картофеля на суглинистых почвах в центральном регионе России. *Картофель и овощи*. 2018;(4):19–21. URL: <http://potatoveg.ru/arxiv> (дата обращения: 27.05.2025).
16. Гаджиев П.И., Рамазанова Г.Г., Гаджиев И.П. Способ возделывания картофеля на тяжелых и каменистых почвах. *Техника и оборудование для села*. 2024;(2):16–18. <https://www.elibrary.ru/olhrdv>
17. Гаджиев П.И., Рамазанова Г.Г., Байбобоев Н.Г., Абдуалиев М.Х., Гаджиев И.П. Анализ работ в области динамической нагруженности комкоразрушающих барабанов от взаимодействия с почвой. *Техника и оборудование для села*. 2025;(3):22–28. <https://www.elibrary.ru/atauwq>
18. Успенский И.А., Юхин И.А., Мачнев А.В., Голиков А.А. Формирование комплекса картофелеуборочных и транспортных машин. *Техника и оборудование для села*. 2021;(2):27–31. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2021-2-27-31>
19. Zhou J.G., Gao Z.N., Chen J., Yang S.M., Li M.Q., Chen Z. и др. Design and Experiment of a Self-Propelled Crawler-Potato Harvester for Hilly and Mountainous Areas. *Inmateh Agricultural Engineering*. 2021;(2):151–158. <https://doi.org/10.35633/inmateh-64-14>
20. Лачуга Ю.Ф., Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Шогенов Ю.Х. Интенсивные машинные технологии, роботизированная техника и цифровые системы для производства основных

- групп сельскохозяйственной продукции. *Техника и оборудование для села*. 2018;(7):2–7. <https://www.elibrary.ru/uuufbg>
21. Дорохов А.С., Сибирёв А.В., Аксенов А.Г., Мосяков М.А., Сазонов Н.В. Математическая модель определения показателей качества энерго-ресурсосберегающей технологии уборки корнеплодов и картофеля в условиях повышенной влажности почвы. *Вестник российской сельскохозяйственной науки*. 2023;(2):78–83. <https://doi.org/10.31857/2500-2082/2023/2/78-83>
 22. Дорохов А.С., Ерохин М.Н., Сибирёв А.В., Мосяков М.А. Энергия разрушения почвенных комков сепарирующим рабочим органом в зависимости от физико-механических свойств почвы. *Агроинженерия*. 2024;26(4):4–12. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-4-4-12>
 23. Бызов В.А., Старовойтов В.И., Старовойтова О.А., Щеголихина Т.А., Манохина А.А. Оптимизация подготовки почвы при возделывании топинамбура. *Техника и оборудование для села*. 2025;(1):22–26. <https://www.elibrary.ru/ukxjsu>
 24. Яруллин Ф.Ф., Ибятков Р.И., Абдуллин Р.Ф., Хазиев А.А. Результаты экспериментальных исследований дискового рабочего органа в почвенном канале. *Техника и оборудование для села*. 2024;(9):12–16. <https://www.elibrary.ru/nvhmed>
 25. Сибирёв А.В., Мосяков М.А., Сазонов Н.В., Мансуров А.П., Лобачевский Я.П. Энергосберегающая технология уборки корнеплодов и картофеля. *Вестник российской сельскохозяйственной науки*. 2024;(4):107–112. <https://doi.org/10.31857/S2500208224040216>
 26. Рамазанова Г.Г., Костенко М.Ю., Гаджиев П.И., Махмутов М.М., Гаджиев И.П., Махмутов М.М. и др. Комкоразрушающее устройство машины для подготовки почвы к комбайновой уборке картофеля. Патент 2834386 С1. Российская Федерация. 6 февраля 2025. <https://www.elibrary.ru/apjmnc>

REFERENCES

1. Dorokhov A.S., Sibirev A.V., Aksenov A.G., Mosyakov M.A., Sazonov M.V. Basis of Developing Automated Machines with Digital Control Systems for Cultivating, Harvesting and Postharvest Processing of Vegetable Crops and Potatoes. *Engineering technologies and systems*. 2022;32(1):145–173. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202201.145-173>
2. Gadzhiev P.I., Ramazanova G.G., Gadzhiev I.P. Development of Resource-Saving Technology and Technical Means for Potato Cultivation. *Science in the Central Russia*. 2024;1(67):110–117. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-1-110-117>
3. Aksenov A.G., Trunov M.S., Petukhov S.N. Justification of the Concept of Creating a Robotic Complex to Improve the Efficiency of Phytosanitary Work in Potato Seed Plantings. *Herald of Ryazan State Agrotechnological University named after P. A. Kostychev*. 2023;15(4):96–105. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.36508/RSATU.2023.74.49.013>
4. Molokanova L.O., Rembalovich G.K., Kostenko M.Y., Shemyakin A.V., Zheltoukhov A.A. Dynamics of the Impact of an Active Elevator Shaker on the Components of a Potato Heap. *Herald of Ryazan State Agrotechnological University named after P. A. Kostychev*. 2025;17.(1):143–150. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.36508/RSATU.2025.72.56.020>
5. Kolchin N.N., Ponomarev A.G., Petukhov S.N. How to Reduce Potato Tubers Damaging Under Machine Technologies. *Potato and Vegetables*. 2019;(3):14–16. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.25630/PAV.2019.48.28.002>
6. Lapin D.A., Volchenkov D.A., Grishin I.I., Nefedov B.A. Theoretical Study of the Trajectories of the Components of the Potato Heap Bar the Elevator of the Harvesting Machine When the Disk Modulators. *International Scientific Journal*. 2017;(6):107–112. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://www.mmegapolis.ru/2017-1/134-vypusk-6.html> (accessed 15.06.2025).
7. Lü J., Shang Q., Yang Y., Li Z., Li J., Liu Z. Design Optimization and Experiment on Potato Haulm Cutter. *Transactions of the CSAM*. 2016;47(5):106–114. <https://doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.015>

8. Starovoitov S.I., Grin A.M. Plough Hull for Precision Tillage. In: XV International Scientific Conference “Interagromash 2022”. Rostov-na-Donu: Springer Nature Switzerland (Zug); 2023. p. 425–432. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-21432-5>
9. Dongre A.U., Battase R., Dudhale S., Patil V.R., Chavan D. Development of Potato Harvesting Model. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2017;4(10):1567–1570. Available at: <https://www.ijet.net/volume4-issue10> (accessed 25.05.2025).
10. Starovoitov S.I., Chemisov N.N. On Determining Soil Elasticity Module. *Vestnik of Federal State Educational Establishment of Higher Professional Education “Moscow State Agroengineering University Named After V. P. Goryachkin”*. 2011;1(46):39–41. (In Russ., abstract in Eng.) <https://www.elibrary.ru/rassxd>
11. Starovoitova O.A., Starovoitov V.I., Manokhina A.A., Dukhanina S.M. Physical and Mechanical Parameters of Soils at the Cultivation of Potato in Ridges. *Zemledelie*. 2018;(5):16–20. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.24411/0044-3913-2018-10504>
12. Starovoitov S.I., Starovoitova N.P., Chemisov N.N. [On the Crumbling Gofloamy Soil]. *Agricultural Machinery and Technology*. 2014;(3):30–34. (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/siwanx>
13. Mak J., Chen Y., Sadek M.A. Determining Parameters of a Discrete Element Model for Soil-Tool Interaction. *Soil and Tillage Research*. 2012;(118):117–122. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.10.019>
14. Obermayr M., Dressler K., Vrettos C., Eberhard P. Prediction of Draft Forces in Cohesionless Soil with the Discrete Element Method. *Journal of Terramechanics*. 2011;48(5):347–358. <https://doi.org/10.1016/J.JTERRA.2011.08.003>
15. Pshechenkov K.A., Maltsev S.V., Smirnov A.V. Technology of Potatoes Combine Harvesting on Loamy Soils in the Central Region of Russia. *Potato and Vegetables*. 2018;(4):19–21. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <http://potatoveg.ru/arxivy> (accessed 27.05.2025).
16. Gadzhiev P.I., Ramazanova G.G., Gadzhiev I.P. Method of Cultivating Potatoes on Heavy and Rocky Soils. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2024;2(320):16–18. (In Russ., abstract in Eng.) <https://www.elibrary.ru/olhrdv>
17. Gadzhiev P.I., Ramazanova G.G., Baiboboev N.G., Abdualiev M.Kh., Gadzhiev I.P. Analysis of Dynamic Loading of Lump-Crushing Drums as a Result Of Interaction with Soil. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2025;(3):22–28. (In Russ., abstract in Eng.) <https://www.elibrary.ru/atauwq>
18. Uspensky I.A., Yukhin I.A., Machnev A.V., Golikov A.A. Creating an Integrated System of Potato Harvesters and Transport Vehicles *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2021;(2):27–31. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2021-2-27-31>
19. Zhou J.G., Gao Z.N., Chen J., Yang S.M., Li M.Q., Chen Z., et al. Design and Experiment of a Self-Propelled Crawler-Potato Harvester for Hilly and Mountainous Areas. *Inmatch Agricultural Engineering*. 2021;(2):151–158. <https://doi.org/10.35633/inmatch-64-14>
20. Lachuga Yu.F., Izmailov A.Yu., Lobachevsky Ya.P., Shogenov Yu.Kh. Intensive Machine Technologies, Robotized Equipment and Digital Systems for Production of Main Groups of Agricultural Products. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2018;(7):2–7. (In Russ., abstract in Eng.) <https://www.elibrary.ru/uufvbg>
21. Dorokhov A.S., Sibirev A.V., Aksenov A.G., Mosyakov M.A., Sazonov N.V. Mathematical Model of Indicators Determination of Quality Root Crops Harvesting and Potato Energy Saving Technology in High Humidity Soil Condition. *Vestnik of the Russian Agricultural Science*. 2023;(2):78–83. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.31857/2500-2082/2023/2/78-83>
22. Dorokhov A.S., Erokhin M.N., Sibirev A.V., Mosyakov M.A. Energy of Soil Clod Crushing with a Separating Working Tool, Depending on Physical and Mechanical Properties of the Soil. *Agricultural Engineering*. 2024;26(4):4–12. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-4-4-12>
23. Byzov V.A., Starovoytov V.I., Starovoytova O.A., Shchegolihina T.A., Manokhina A.A. Optimization of Soil Preparation for Jerusalem Artichoke Cultivation. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2025;(1)22–26. (In Russ., abstract in Eng.) <https://www.elibrary.ru/ukxjsu>

24. Yarullin F.F., Ibyatov R.I., Abdullin R.F., Khaziev A.A. Results of Experimental Studies of a Disk Working Body in a Soil Channel. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2024;(9):12–16. (In Russ., abstract in Eng.) <https://www.elibrary.ru/nvhmed>
25. Sibirev A.V., Mosyakov M.A., Sazonov N.V., Mansurov A.P., Lobachevsky Ya.P. Energy Saving Technology for Harvesting Root Crops and potatoes. *Vestnik of the Russian Agricultural Science*. 2024;(4):107–112. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.31857/S2500208224040216>
26. Ramazanova G.G., Kostenko M.Y., Gadzhiev P.I., Makhmutov M.M., Gadzhiev I.P., Makhmutov M.M., et al. Clod Breaking Device of Machine for Soil Preparation for Combine Harvesting of Potatoes. Patent 2834386 C1 Russian Federation. 2025 February 6. (In Russ., abstract in Eng.) <https://www.elibrary.ru/apjmnc>

Об авторах:

Успенский Иван Алексеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технической эксплуатации транспорта Рязанского государственного агротехнологического университета имени П. А. Костычева (390044, Российская Федерация, г. Рязань, ул. Костычева, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4343-0444>, Scopus ID: 57193743041, Researcher ID: B-7990-2019, ivan.uspensckij@yandex.ru

Рамазанова Гюльбике Гудретдиновна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологического развития систем жизнеобеспечения сельских территорий Российского государственного университета народного хозяйства имени В. И. Вернадского (143907, Российская Федерация, г. Балашиха, ул. Шоссе Энтузиастов, д. 50), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2758-9479>, Scopus ID: 56072031000, Researcher ID: CPQ-5874-2022, gulbike@yandex.ru

Костенко Михаил Юрьевич, доктор технических наук, профессор кафедры технологии металлов и ремонта машин Рязанского государственного агротехнологического университета имени П. А. Костычева (390044, Российская Федерация, г. Рязань, ул. Костычева, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3733-3717>, Researcher ID: G-9926-2019, km340010@rambler.ru

Гаджиев Парвиз Имранович, доктор технических наук, профессор, декан факультета информационного и технического сервиса Российского государственного университета народного хозяйства имени В. И. Вернадского (143907, Российская Федерация, г. Балашиха, ул. Шоссе Энтузиастов, д. 50), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6877-6126>, Researcher ID: DNC-7890-2022, pgadjiev@yandex.ru

Вклад авторов:

И. А. Успенский – формулирование замысла/идеи исследования, целей и задач.

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

М. Ю. Костенко – разработка математической зависимости, критический анализ полученных результатов.

П. И. Гаджиев – разработка или проектирование методологии исследования; создание моделей.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 15.06.2025; поступила после рецензирования 28.10.2025;
принята к публикации 19.11.2025*

About the authors:

Ivan A. Uspenskiy, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Technical Operation of Transport, Ryazan State Agrotechnological University Named after P. A. Kostychev (1 Kostychev St., Ryazan 390044, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4343-0444>, Scopus ID: 57193743041, Researcher ID: B-7990-2019, ivan.uspenskiy@yandex.ru

Gulbike G. Ramazonova, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technological Development of Life Support Systems in Rural Areas, Vernadsky Russian State University of National Economy (50 Jentuziastov Highway St., Balashikha 143907, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2758-9479>, Scopus ID: 56072031000, Researcher ID: CPQ-5874-2022, gulbike@yandex.ru

Mikhail Yu. Kostenko, Dr.Sci. (Eng.), Professor of Metal Technology and Machine Repair Chair, Ryazan State Agrotechnological University Named after P. A. Kostychev (1 Kostychev St., Ryazan 390044, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3733-3717>, Researcher ID: G-9926-2019, km340010@rambler.ru

Parviz I. Gadzhiev, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Dean of the Information and Technical Service Faculty, Vernadsky Russian State University of National Economy (50 Jentuziastov Highway St., Balashikha 143907, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6877-6126>, Researcher ID: DNC-7890-2022, pgadjiev@yandex.ru

Authors contribution:

I. A. Uspenskiy – formulating the study concept/idea, goals, and objectives.

G. G. Ramazonova – annotating (creating metadata), data cleaning, and maintaining the data integrity (including interpretive code, where necessary) for their initial using and reusing.

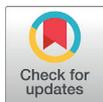
M. Y. Kostenko – developing the mathematical relationship, critical analyzing of the results obtained.

P. I. Gadzhiev – developing or designing of the study methodology; creating models.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 15.06.2025; revised 28.10.2025; accepted 19.11.2025

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ / TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT


<https://doi.org/10.15507/2658-4123.036.202601.081-096>

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

УДК / UDK 001.891.57:631.17:634.739.2

Оригинальная статья / Original article

Применение аддитивных технологий для моделирования механических характеристик ягод клюквы крупноплодной

 П. Ю. Крупенин¹, А. К. Рендов¹, В. М. Кузюр²,
 С. И. Будко², В. Ф. Купряшкин³, А. С. Уланов³✉

¹ Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции
 и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия,
 г. Горки, Республика Беларусь, <https://ror.org/04y99m182>
² Брянский государственный аграрный университет,
 с. Кокино, Российская Федерация, <https://ror.org/019aeg752>
³ Национальный исследовательский
 Мордовский государственный университет,
 г. Саранск, Российская Федерация, <https://ror.org/0262qgk29>

 ✉ ulanow.aleksandr2010@yandex.ru

Аннотация

Введение. Клюква крупноплодная обладает лечебно-профилактическими свойствами, что обуславливает ее широкое потребление. В связи с сокращением площади, занимаемой дикорастущими растениями клюквы, для удовлетворения потребности населения необходимо увеличивать объемы ее промышленного выращивания. Главной проблемой при возделывании культуры в условиях промышленных плантаций является применение низкопроизводительных агромашин для сбора урожая, поэтому совершенствование технического обеспечения процесса уборки клюквы крупноплодной является актуальной научно-технической задачей. Модернизация таких машин сопряжена с проведением натурных экспериментальных исследований, заключающихся в имитировании функционирования агрегатов на различных режимах работы. При их выполнении модернизируемая машина взаимодействует с убираемой культурой – клюквой, макеты ягод которой со свойствами, идентичными реальным ягодам, возможно воссоздать при помощи аддитивных технологий.

Цель исследования. Расширение возможностей лабораторного оборудования и программного обеспечения за счет применения аддитивных технологий при проведении экспериментальных исследований взаимодействия рабочих элементов уборочных машин с ягодами клюквы крупноплодной.

Материалы и методы. Объект исследования – клюква крупноплодная сорта Стивенс. В основу методики определения массоразмерных характеристик ягод положен «мокрый» способ уборки. Массу ягод определяли взвешиванием на весах. В качестве линейных размеров штангенциркулем определяли длину ягоды и два поперечных

© Крупенин П. Ю., Рендов А. К., Кузюр В. М., Будко С. И., Купряшкин В. Ф., Уланов А. С., 2026


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

размера в плоскостях измерений, расположенных под углом в 90° относительно друг друга. Определение объема ягод выполняли измерением объема вытесняемой жидкости и расчетным методом. Создание 3D-модели выполняли в программном обеспечении *FlashPrint 5*, для распечатывания макетов применяли 3D-принтер *Flashforge Finder* и пластик полилактид (ПЛА, PLA).

Результаты исследования. Разработана методика расчета параметров макетов ягод клюквы крупноплодной с применением аддитивных технологий. Созданы максимально приближенные макеты ягод. Выявлено, что с увеличением размера фракции ягоды от 1 до $5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ плотность созданных макетов клюквы снижается на 66,2 % с $1367,37 \text{ кг/м}^3$ до $461,98 \text{ кг/м}^3$, а объем увеличивается в 5,3 раз с $0,81 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ до $4,26 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$.

Обсуждение и заключение. Применение аддитивных технологий позволило создать максимально приближенный макет ягод клюквы крупноплодной из недорогого и долговечного материала, полностью повторяющего свойства плодов, выращенных в условиях плантации, что может упростить проведение лабораторных исследований уборочного процесса ягод мокрым способом и снизить финансовые издержки при их реализации.

Ключевые слова: клюква крупноплодная, аддитивные технологии, массоразмерные характеристики, 3D-макет, плотность макетов, уборка клюквы

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Крупенин П.Ю., Рендов А.К., Кузюр В.М., Будко С.И., Купряшкин В.Ф., Уланов А.С. Применение аддитивных технологий для моделирования механических характеристик ягод клюквы крупноплодной. *Инженерные технологии и системы.* 2026;36(1):81–96. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.036.202601.081-096>

Application of Additive Technologies for Simulating Mechanical Characteristics of Large-Fruited Cranberries

P. Y. Krupenin^a, A. K. Rendov^a, V. M. Kuzyur^b,
S. I. Budko^b, V. F. Kupryashkin^c, A. S. Ulanov^c✉

^a Belarusian State Agricultural Academy,
Gorki, Republic of Belarus, <https://ror.org/04y99m182>

^b Bryansk State Agrarian University,
Kokino, Russian Federation, <https://ror.org/019aeg752>

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

✉ ulanow.aleksandr2010@yandex.ru

Abstract

Introduction. Large-fruited cranberries have therapeutic and prophylactic properties, which cause their wide consumption. Because of reducing the areas occupied by wild cranberry, it is necessary to increase industrial cultivation of cranberries to meet public demand. The main challenge in cultivating the cranberries on industrial plantations is the use of low-performance agricultural machinery for harvesting. Therefore, improving the machinery for harvesting large-fruited cranberries is a topical scientific and technical task. Upgrading this equipment involves conducting field experimental studies, which consist in simulating the operation of the units in various operating modes. During these studies, the being upgraded machine interacts with the being harvested cranberries, the mock-ups of which with properties identical to real cranberries can be created using additive technologies.

Aim of the Study. The study is aimed at expanding the capabilities of laboratory equipment and software by using additive technologies in experimental studies of the interaction between the working elements of harvesting machines and large-fruited cranberries.

Materials and Methods. The object of the study was the Stevens large-fruited cranberry variety. The method for determining the cranberry weight-size characteristics was based on the wet harvesting method. The weight of cranberries was determined by weighing on scales. A caliper was used to measure linear dimensions of cranberries, including length and two transverse dimensions in measurement planes positioned at 90° relative to each other. The volume of cranberries was determined by determining the volume of displaced cranberry liquid and with the use of the calculating method. 3D models were developed using FlashPrint 5 software, using a Flashforge Finder 3D printer and polylactide (PLA) plastic to print mock-ups.

Results. Using additive technologies, there has been developed a method for calculating the parameters for large-fruited cranberry mock-ups. There have been created the mock-ups of cranberries maximally approximate to the originals. It has been found that an increase in the cranberry fraction size from 1 to $5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$, the density of the created cranberry mock-ups decreases by 66.2% from 1367.37 kg/m^3 to 461.98 kg/m^3 , and the volume increases by 5.3 times from $0.81 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ to $4.26 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$.

Discussion and Conclusions. The additive technologies made it possible to create from an inexpensive and long-life material highly accurate mock-ups of large-fruited cranberries fully replicate the properties of cranberries grown on a plantation. This could simplify laboratory research of the wet cranberry harvesting and reduce the financial costs of their sale.

Keywords: large-fruited cranberry, additive technologies, weight-dimensional characteristics, 3D model, density of mock-ups, cranberry harvesting

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

For citation: Krupenin P.Y., Rendov A.K., Kuzyur V.M., Budko S.I., Kupryashkin V.F., Ulanov A.S. Application of Additive Technologies for Simulating Mechanical Characteristics of Large-Fruited Cranberries. *Engineering Technologies and Systems*. 2026;36(1):81–96. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.036.202601.081-096>

ВВЕДЕНИЕ

Одним из самых ценных дикорастущих растений в Республики Беларусь благодаря своим высоким пищевым и лечебно-профилактическим свойствам является клюква¹. Она содержит значительное количество биологически активных веществ². В совокупности это обеспечивает ягоде высокий спрос как на внутреннем, так и на внешнем рынках³. В настоящее время происходит сокращение площади, занимаемой дикорастущими растениями клюквы⁴. Чтобы удовлетворить потребности

¹ Крупенин П.Ю., Рендов А.К., Лягуский А.Г. Направление совершенствования технического обеспечения процесса уборки клюквы крупноплодной. В: Аграрная наука – сельскому хозяйству: материалы XVIII Междунар. науч.-практ. конф. Барнаул: Алтайский гос. аграрный ун-т; 2023. С. 131–132. <https://elibrary.ru/tzuixz>

² Рендов А.К. Повышение эффективности промышленного производства клюквы путем совершенствования средств механизации для ее возделывания В: Актуальные вопросы механизации сельскохозяйственного производства: материалы Междунар. науч. конф. студентов и магистрантов. Горки: БГСХА; 2023. С. 94–97. <https://elibrary.ru/xhdokf>; Крупенин П.Ю., Рендов А.К. Моделирование механических характеристик ягод клюквы крупноплодной с использованием аддитивных технологий. В: Наука – практике: материалы VI Международ. науч.-практ. конф. Барановичи: БарГУ; 2025. С. 387–388.

³ Астахов В.С., Рендов А.К. К вопросу обеспечения экологической безопасности сельскохозяйственной отрасли. В: Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения: сб. науч. работ. Брянск: Брянский ГАУ; 2023. С. 251–257. <https://www.elibrary.ru/mdcghv>

⁴ Крупенин П.Ю., Рендов А.К., Лягуский А.Г. Анализ способов уборки клюквы крупноплодной. В: Современные тенденции развития аграрной науки: сб. науч. тр. II Междунар. науч.-практ. конф. Брянск: Брянский ГАУ; 2023. Ч. 2. С. 231–237. <https://elibrary.ru/olgatf>

населения нужно увеличивать объемы промышленного выращивания клюквы крупноплодной⁵. Одной из проблем технологии выращивания данной культуры на промышленных плантациях Республики Беларусь является применение малопродуктивных и трудоемких технических средств для уборки урожая⁶ [1]. Так, актуальной научно-технической задачей является усовершенствование технического обеспечения процесса сбора плодов клюквы крупноплодной⁷. Для того, чтобы это осуществить требуются свежие ягоды. Однако они имеют ограниченный срок годности, что затрудняет проведение лабораторных исследований в течение длительного времени. Поэтому необходимо найти им альтернативу. Метод аддитивных технологий (3D-печати) [2; 3] может позволить получить прочный, износостойкий и непортящийся материал⁸ [4–6], точно имитирующий поведение реальных ягод клюквы при их погружении в воду⁹ [7; 8], что упростит и удешевит проведение лабораторных исследований процесса уборки ягод клюквы крупноплодной мокрым способом¹⁰ [9].

Таким образом, применение аддитивных технологий позволит вывести на новый уровень методики проведения экспериментальных исследований взаимодействия рабочих элементов уборочных машин с ягодами клюквы крупноплодной. Так, целью исследования является расширение функциональных возможностей лабораторного оборудования с созданием программного продукта, который даст возможность развивать представленные в статье исследования и применять их при изучении других методов уборки ягодных культур.

⁵ Крупенин П.Ю., Рендов А.К., Лягуский А.Г. Техническое обеспечение процесса уборки клюквы крупноплодной. В: Инновационные технологии в агропромышленном комплексе – сегодня и завтра: сб. науч. ст. 7-й Междунар. науч.-практ. конф. Гомель: Научно-технический центр комбайностроения ОАО «Гомсельмаш»; 2023. С. 207–212. <https://elibrary.ru/vsvjmc>

⁶ Крупенин П.Ю., Рендов А.К. Перспективное оборудование для уборки клюквы крупноплодной мокрым способом. В: Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства: сб. науч. тр. Горки: БГСХА; 2024. С. 196–199. <https://elibrary.ru/uwuhfa>

⁷ Астахов В.С., Гусаров В.В., Валоженич Г.А., Рендов А.К. Совершенствование машин для химической защиты с целью снижения влияния пестицидов на качество сельскохозяйственных продуктов. В: Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства: сб. науч. тр. Горки: БГСХА; 2023. С. 204–207. URL: <https://elib.baa.by/xmlui/handle/123456789/4137?show=full> (дата обращения: 21.04.2025); Лягуский А.Г., Крупенин П.Ю. Исследование процесса формирования ягодного вороха клюквы крупноплодной методами аналитической геометрии. В: Молодые исследователи агропромышленного и лесного комплексов – регионам: сб. науч. тр. IX Всероссийской науч.-практ. конф. с междунар. участием. Вологда: ФГБОУ ВО Вологодская ГМХА; 2024. С. 134–138. <https://www.elibrary.ru/hagooc>

⁸ Мисун А.Л. Управление уровнем профессиональных рисков в промышленном выращивании клюквы. В: Механизация и электрификация сельского хозяйства: сб. ст.: Минск: РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»; 2016. С. 128–134. URL: <https://mechel.belab.by/jour/article/view/480> (дата обращения: 14.04.2025).

⁹ Ленковец Т.И. Сохраняемость плодов клюквы крупноплодной в зависимости от способа уборки урожая. В: Плодоводство: сб. науч. тр. Минск: Издательский дом; 2020. С. 215–219. URL: <https://fruit.belab.by/jour/article/view/71> (дата обращения: 21.04.2025); Ленковец Т.И. Урожайность и масса плода сортов клюквы крупноплодной, интродуцированных в Беларуси. В: Плодоводство: сб. науч. тр. Минск: Издательский дом; 2022. С. 134–139. <https://doi.org/10.47612/0134-9759-2022-34-134-139> (дата обращения: 21.04.2025).

¹⁰ Крупенин П.Ю., Рендов А.К., Лягуский А.Г. Анализ технических средств для уборки клюквы крупноплодной в затопленном чеке. В: Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства: сб. науч. тр. Горки: Белорус. гос. с.-х. акад.; 2025. С. 160–163. <https://www.elibrary.ru/oumqme>; Averill A. Cranberry production guide: Cranberry production guide. University of Massachusetts – amherst (suppl.). 2008:198. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/32437959.pdf> (дата обращения: 21.04.2025).

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В отличие от традиционной промышленной механической обработки заготовок, полученных литьем или штамповкой, аддитивный технологический процесс представляет собой изготовление деталей и трехмерных объектов путем послойного наложения используемого материала (пластик, металл, бетон и др.)¹¹. Указанные технологические особенности позволяют использовать аддитивные технологии для изготовления объектов не только с точными геометрическими размерами, но и с определенными физико-механическими свойствами (плотность, упругость, шероховатость поверхности и др.).

Исследования физико-механических свойств ягод клюквы и научное обоснование параметров и режимов работы технических средств для возделывания и уборки данной культуры приведены в публикациях зарубежных исследователей¹² [10; 11].

В. В. Азаренко предложена модель для оценки влияния природно-климатических и агрономических факторов на эффективность и безопасность промышленного выращивания крупноплодной клюквы в условиях контролируемой производственной среды [12; 13]. Исследована экономическая эффективность инженерно-технических решений для улучшения условий и повышения безопасности механизированного ухода за клюквенным покровом чека. Ученый разработал методику проведения исследований приспособленности технических средств для промышленного выращивания клюквы к безопасному управлению технологическими операциями на чеке¹³.

Исследователи из Беларуси разработали научные и технологические основы производства крупноплодной клюквы в промышленном чеке. Изучены физико-механические свойства ягод, индекс формы, силы сопротивления раздавливанию и отрыву, критическая высота падения ягод, коэффициент их относительной прочности. Выполнен технико-экономический анализ технических средств

¹¹ 5D.BY – 3D-печать [Электронный ресурс] : сайт. URL: <https://5d.by/3d-pechat/?yclid=9503773741403078655> (дата обращения: 13.04.2025).

¹² Яковлев А.П. Культивирование клюквы крупноплодной и голубики топяной на выработанных торфяниках севера Беларуси: оптимизация режима минерального питания: моногр. Минск: Тонпик; 2002. 188 с. URL: <https://elib.nlb.by/catalog/Record/BY-NLB-br460245/Details> (дата обращения: 02.05.2025); Можайский Ю.А., Лихащев А.П. Сохранение и повышение продуктивности мелиорируемых земель Центра Нечерноземной зоны России и Беларуси: моногр. Рязань: Рязанская гос. с.-х. акад. им. П. А. Костычева; 2005. 582 с. URL: <https://elib.nlb.by/catalog/Record/BY-NLB-br708137?sid=79172037> (дата обращения: 16.05.2024).

¹³ Азаренко В.В., Мисун А.Л., Ларичев А.Ю. Результаты исследований экономической эффективности инженерно-технических решений для улучшения условий и повышения безопасности механизированного ухода за клюквенным покровом чека. В: Механизация и электрификация сельского хозяйства. сб. ст.: Минск: РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»; 2022. С. 274–278. URL: <https://mechel.belal.by/jour/article/view/383> (дата обращения: 22.05.2024); Азаренко В.В., Мисун А.Л., Ларичев А.Ю. Научно-методические обеспечение исследований безопасности управления технологическими операциями на клюквенном чеке. В: Механизация и электрификация сельского хозяйства. сб. ст.: Минск: РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»; 2022. С. 262–273. URL: <https://mechel.belal.by/jour/article/view/382> (дата обращения: 22.05.2024); Азаренко В.В., Мисун А.Л., Ларичев А.Ю. Обоснование безопасных условий эксплуатации промышленной плантации крупноплодной клюквы. В: Механизация и электрификация сельского хозяйства. сб. ст.: Минск: РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»; 2015. С. 139–146. URL: <https://mechel.belal.by/jour/article/view/167> (дата обращения: 24.05.2024).

для механизированной уборки и послеуборочной обработки ягод, обоснованы рациональные параметры и режимы работы технологического оборудования¹⁴ [5].

А. Л. Мисун предложил систему управления уровнем профессиональных рисков в промышленном выращивании клюквы, обосновал рациональные режимы технического средства и определил безопасные режимы его работы¹⁵ [14].

В ходе исследования по сохраняемости плодов клюквы крупноплодной в зависимости от способа уборки урожая установлено, что способ уборки ягод следует учитывать при планировании работ по их переработке [6]. А. Текгюлер, Т. Каракесе предложен способ механизированного сбора, обеспечивающий снижение трудозатрат и себестоимости готовой продукции [15].

В результате анализа апробационных признаков районирования в Беларуси сортамента клюквы крупноплодной обоснована необходимость комплексно учитывать отличительные морфологические признаки данной культуры¹⁶ [16].

Л. Брондино, П. Кузьяр, Л. В. Де Веттер провели исследования по механизированной уборке различных ягодных культур, в результате чего установили необходимость экспериментировать и разрабатывать новые эффективные способы уборки, способные обеспечить получение продукта, сопоставимого по качеству с собранными вручную ягодами [17–19].

Представленные исследования в областях возделывания клюквы и совершенствования технических средств ее уборки показали, что они требуют проведения лабораторных натуральных испытаний, которые невозможно осуществить без наличия свежих ягод. В результате таких исследований устанавливаются массово-габаритные характеристики ягод, на основании которых возможно воссоздать макеты ягод клюквы с заданными свойствами, идентичными реальным плодам.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объекты исследования

Объектами исследования являлись свежие ягоды клюквы крупноплодной сорта Стивенс, собранные в 2024 году на ягодных плантациях ОАО «Полесские Журавины» (объем выборки 500 ягод).

Методы, оборудование, процедура исследования

Массогабаритные характеристики играют важную роль в исследовании ягод клюквы крупноплодной. Градация по размерам включает в себя три основные группы: мелкая, средняя и крупная. Для того чтобы отнести ягоды к одной из этих групп можно использовать любой из габаритных размеров, присущих ягоде –

¹⁴ Решетников В.Н., Рубан Н.Н., Спиридович Е.В., Паромчик И.И., Алексеева Е.И., Войцеховская Е.А. Рациональное использование клюквы крупноплодной. В: Культура брусничных ягодников: итоги и перспективы: материалы Междунар. науч. конф. Минск: ЦБС НАН Беларуси; 2005. С. 164–168. <https://www.elibrary.ru/woixrd>

¹⁵ Азаренко В.В., Мисун А.Л., Ларичев А.Ю. Научно-методическое обеспечение исследований безопасности управления технологическими операциями на клюквенном чеке; Азаренко В.В., Мисун А.Л., Ларичев А.Ю. Обоснование безопасных условий эксплуатации промышленной плантации крупноплодной клюквы.

¹⁶ Павловский Н.Б., Ленковец Т.И., Дроздов О.В., Колодко Е.А., Павловская А.Г. Апробационные признаки районированного в Беларуси сортамента клюквы крупноплодной. В: Плодоводство и ягодоводство в Беларуси и за рубежом: материалы Междунар. науч. конф. Минск: ЦБС НАН Беларуси; 2022. С. 127–133. <https://www.elibrary.ru/shlscs>

длина, ширина или высота. Методика проведения исследований массоразмерных свойств ягод клюквы крупноплодной предполагала определение массы, линейных размеров и объема ягод¹⁷. Массу ягод определяли взвешиванием на весах RADWAG WLC 0.6/B1 с погрешностью 0,01 г. В качестве линейных размеров ягод определяли их наибольший размер (длину ягоды L_{ya}) и два поперечных размера в плоскостях измерений расположенных под углом в 90° относительно друг друга (диаметры ягоды D_{ya1} , D_{ya2}). Измерения линейных размеров выполняли штангенциркулем ШЦЦ-10-150 с ценой деления 0,01 мм. Определение объема ягод выполняли двумя способами: измерением объема вытесняемой ягодой жидкости и расчетным методом.

Для измерения объема вытесняемой жидкости использовали мерный цилиндр марки 1-25-2 (цена деления – 0,5 мл), частично заполненный дистиллированной водой, в которую утапливали исследуемую ягоду клюквы. Объем ягоды высчитывали по разности уровня жидкости в цилиндре до и после погружения ягоды.

Для определения объема ягоды расчетным методом использовали измеренные значения ее размеров (L_{ya} , D_{ya1} , D_{ya2}), а объем вычисляли по формуле объема эллипсоида:

$$V_{ya} = \frac{\pi}{6} L_{ya} D_{ya1} D_{ya2},$$

где V_{ya} – объем ягоды, м³; L_{ya} – длина ягоды, м; D_{ya1} – диаметр ягоды, м; D_{ya2} – диаметр ягоды, м.

Измеренный объем ягод определяли методом вытесняемой ягодой жидкости, для чего брали мерную мензурку с водой, фиксируя начальный объем воды V_1 . Затем погружали ягоду в зависимости от размера фракции в воду и фиксировали новый объем воды V_2 . Разница между V_1 и V_2 – реальный объем исследуемой ягоды клюквы. Метод вычисленного объема заключался в снятии габаритных размеров ягоды с помощью измерительного инструмента и в определении объема при помощи арифметических операций.

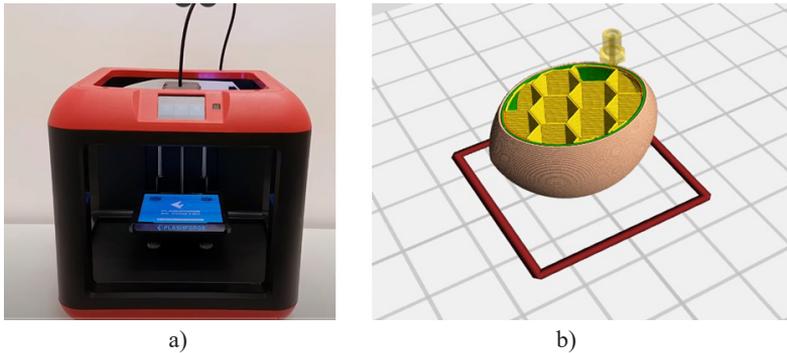
Используя результаты экспериментальных исследований массоразмерных характеристик ягод клюквы крупноплодной, определили средние диаметры D_1 , D_2 и плотность ρ ягод следующих фракций по объему: до $1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ – $D_1 = 0,0123 \text{ м}$, $D_2 = 0,0127 \text{ м}$, $\rho = 1367,37 \text{ кг/м}^3$; $1-2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ – $D_1 = 0,0128 \text{ м}$, $D_2 = 0,0131 \text{ м}$, $\rho = 873,48 \text{ кг/м}^3$; $2-3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ – $D_1 = 0,0130 \text{ м}$, $D_2 = 0,0133 \text{ м}$, $\rho = 717,95 \text{ кг/м}^3$; $3-4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ – $D_1 = 0,0135 \text{ м}$, $D_2 = 0,0138 \text{ м}$, $\rho = 615,13 \text{ кг/м}^3$; более $4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ – $D_1 = 0,0142 \text{ м}$, $D_2 = 0,0144 \text{ м}$, $\rho = 461,98 \text{ кг/м}^3$.

В качестве способа изготовления макетов ягод клюквы крупноплодной использовали аддитивные технологии (3D-печать). По данному способу внутренние пространства модели могут изготавливаться однородно (сплошная оболочка) и неоднородно (внутреннее пространство частично заполнено материалом). Структура неоднородных пространств имеет, как правило, четыре основных разновидности: прямоугольная, треугольная, волнообразная и сотообразная. Степень заполнения пространств измеряется в процентах, где 0 % – это пустотелая модель, а 100 % – полнотелая.

¹⁷ Cranberry Station Best Management Practices Guide. Amherst: University of Massachusetts; 2000.

Разработали методику расчета параметров макетов ягод (рис. 1), предусматривающую изменение массы и, как следствие, плотности макетов посредством различной степени заполнения пластиком их внутренней полости. Создание 3D-модели ягод выполняли в программном обеспечении *FlashPrint 5*, позволяющем настраивать такие параметры модели как толщина слоя, степень заполнения внутреннего пространства и др.

Для изготовления макетов был выбран пластик полилактид (ПЛА, PLA). Его плотность – 1 230–1 250 кг/м³. Для распечатывания макетов применяли 3D-принтер Flashforge Finder.



Р и с. 1. Оборудование и результат применения аддитивных технологий: а) 3D-принтер Flashforge Finder; б) программное обеспечение *FlashPrint 5*

F i g. 1. Equipment and results of using additive technologies: а) Flashforge Finder 3D printer; б) FlashPrint 5 software

Источник: фотография для рисунка 1 а была сделана П. Ю. Крупениным в лаборатории кафедры механизации животноводства и электрофикации сельскохозяйственного производства БГСХА (г. Горки, Республика Беларусь). Рисунок 1 б создан авторами статьи в программе *FlashPrint 5*.

Source: photo 1 a was taken by P. Yu. Krupenin in the laboratory of the Department of Animal Husbandry Mechanization and Electrification of Agricultural Production at the Belarusian State Agricultural Academy (Gorki, Republic of Belarus). Figure 1 b was created by the authors using the FlashPrint 5 software.

Чтобы масса и плотность макета соответствовали реальной ягоде необходимо определить степень заполнения внутреннего пространства при печати макета. Правильная степень заполнения повысит точность модели, гарантируя, что она будет вести себя на воде аналогично реальной ягоде клюквы. Заполнение внутренней полости пространственной структурой стабилизирует форму модели и позволяет ей сопротивляться физическим нагрузкам. В совокупности это предоставляет возможность использовать макеты ягод в ходе лабораторных исследований по обоснованию параметров технических средств для уборки клюквы крупноплодной «мокрым» способом.

Объем оболочки макета V_{ob} рассчитали по формуле:

$$V_{ob} = \frac{\pi}{6} D_f^2 \cdot L_f - (L_f - 2b)(D_f - 2b)^2, \quad (1)$$

где D_f – средний диаметр ягод в фракции, м; L_f – средняя длина ягоды в фракции, м; b – толщина стенки макета, $b = 0,8 \cdot 10^{-3}$ м.

Масса оболочки макета m_{ob} :

$$m_{ob} = V_{ob} \cdot \rho_{pla}, \quad (2)$$

где ρ_{pla} – плотность пластика, $\rho_{pla} = 1\,250 \text{ кг/м}^3$.

Масса внутренней части макета m_{vn} :

$$m_{vn} = m_f - m_{ob}, \quad (3)$$

где m_f – средняя масса ягод во фракции, кг.

Зная массу внутренней части макета, рассчитали требуемый объем пластика для его заполнения:

$$V_{pla-vn} = \frac{m_{vn}}{\rho_{pla}}. \quad (4)$$

Объем внутренней части макета V_{vn} :

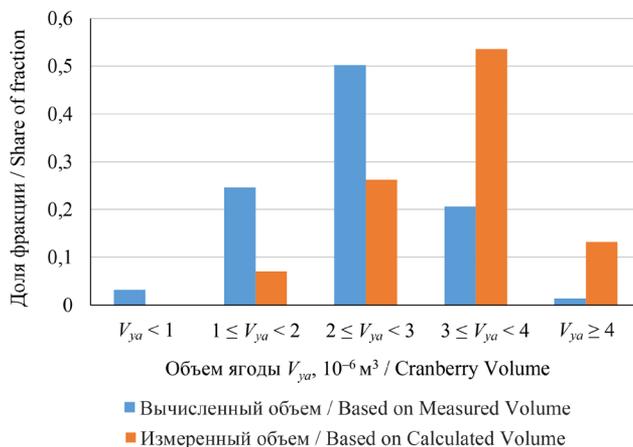
$$V_{vn} = \frac{\pi}{6} [(L_f - 2b)(D_f - 2b)^2]. \quad (5)$$

Степень заполнения внутренней части макета пластиком Z нашли по формуле:

$$Z = \frac{V_{pla-vn}}{V_{vn}} \cdot 100 \%. \quad (6)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Распределение объема ягод клюквы крупноплодной, вычисленного по формуле и измеренного методом вытеснения жидкости представили на гистограмме (рис. 2).



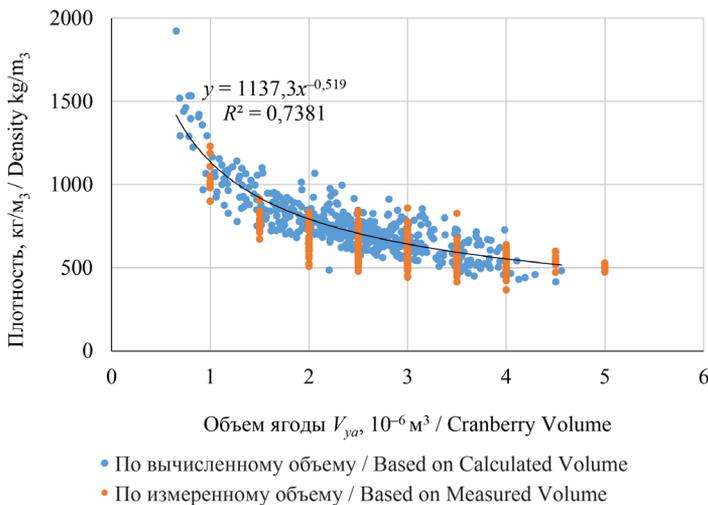
Р и с. 2. Гистограммы распределения объема ягод клюквы крупноплодной
F i g. 2. Histograms of the distribution of the volume of large-fruited cranberries

Источник: рисунки 2, 3 составлены авторами статьи в программе Microsoft Excel.
Source: figures 2, 3 were compiled by the authors using the Microsoft Excel software.

При анализе распределений ягод клюквы крупноплодной (рис. 2) было выявлено, что наибольшая часть ягод имеет объем $2 \cdot 10^{-6} \dots 4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$. Следует отметить, что распределения по вычисленному и измеренному объемам несколько отличаются друг от друга. Из рисунка 2 видно, что распределение ягод по измеренному объему смещено примерно на 10^{-6} м^3 в большую сторону относительно распределения по вычисленному объему.

В связи с расхождением фракционного состава ягод клюквы крупноплодной, полученного на основании вычисленного и измеренного объема ягод, провели сопоставление результатов измерений с имеющимися в литературных источниках данными [6] и установили, что распределение ягод клюквы крупноплодной по фракциям на основании вычисленного объема лучше согласуется с имеющейся априорной информацией. Таким образом, можно предположить, что вычисление объема ягоды по трем линейным измерениям обеспечивает меньшую погрешность по сравнению с прямым определением ее объема методом вытеснения жидкости.

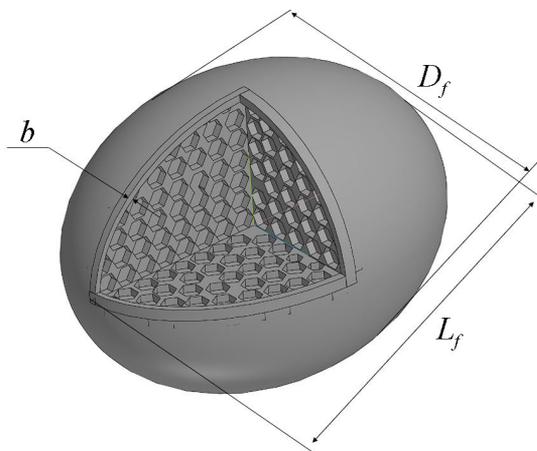
Распределение плотности ягод клюквы крупноплодной, рассчитанной по вычисленному и измеренному объемам, показано на рисунке 3. При построении графика по оси абсцисс откладывали объем каждой ягоды, а по оси ординат – плотность, в результате чего получили облако точек, представляющее собой распределение плотности ягод в зависимости от их объема.



Р и с. 3. Распределение плотности ягод клюквы крупноплодной
F i g. 3. Distribution of the density of large-fruited cranberries

Значение коэффициента детерминации ($R^2 = 0,7381$) говорит о сильной зависимости плотности ягоды от ее объема. В целом, плотность мелких ягод клюквы в 3 раза больше плотности крупных. Таким образом, в лабораторных исследованиях рабочего процесса узлов машин для уборки клюквы крупноплодной мокрым способом следует использовать макеты ягод, идентичные размеру и плотности реальных ягод соответствующих фракций.

3D-модель макета ягоды клюквы (рис. 4) представляет собой эллипсоид с осями L_f , D_f . Конструктивно модель имеет сплошную оболочку толщиной b , пространство внутри которой заполнено сотовой структурой.



Р и с. 4. 3D-модель макета ягоды клюквы

F i g. 4. 3D model of a cranberry mock-up

Примечание: b – толщина стенки оболочки, м; L_f – средняя длина ягод, м; D_f – средний диаметр ягод, м.

Note: b – shell wall thickness, m; L_f – the average length of the cranberries, m; D_f – the average diameter of the cranberries, m.

Источник: рисунок 4 составлен авторами статьи в программе *FlashPrint 5*.

Source: figure 4 was created by the authors using the *FlashPrint 5* software.

Результаты расчетов по формулам (1–6) для различных фракций ягод клюквы крупноплодной приведены в таблице. Расчетная степень заполнения для изготовления макета принимается равной 100 %.

Т а б л и ц а

T a b l e

Параметры макетов ягод клюквы для изготовления методом 3D-печати

Parameters for cranberry berry mock-ups for 3D printing

| Фракция, $10^{-6} \text{ м}^3 /$ Fraction, 10^{-6} м^3 | Диаметр D_f , $\times 10^{-3} \text{ м} /$ Diameter D_f , $\times 10^{-3} \text{ м}$ | Длина L_f , $\times 10^{-3} \text{ м} /$ Length L_f , $\times 10^{-3} \text{ м}$ | Масса m_f , $\times 10^{-3} \text{ кг} /$ Weight m_f , $\times 10^{-3} \text{ кг}$ | Объем V_f , $\times 10^{-6} \text{ м}^3 /$ Volume V_f , $\times 10^{-6} \text{ м}^3$ | Плотность ρ_{cr} , $\text{кг}/\text{м}^3 /$ Density ρ_{cr} , $\text{кг}/\text{м}^3$ | Расчетная степень заполнения, % / Estimated degree of filling, % |
|---|---|---|---|---|--|--|
| до 1/ up to 1 | 10,48 | 14,20 | 1,12 | 0,81 | 1367,37 | 116,1 |
| 1–2 | 13,53 | 16,61 | 1,39 | 1,59 | 873,48 | 57,9 |
| 2–3 | 15,85 | 18,85 | 1,78 | 2,48 | 717,95 | 43,1 |
| 3–4 | 17,73 | 20,68 | 2,09 | 3,40 | 615,13 | 34,0 |
| более 5 / more than 5 | 19,01 | 22,53 | 1,97 | 4,26 | 461,98 | 19,5 |

Анализ параметров макетов ягод клюквы для изготовления методом аддитивных технологий показывает, что найденные значения массы m_f , объема V_f и плотности ρ_{cr} изготовленных макетов совпадают с реальными значениями, что обуславливает их использование при проведении лабораторных исследований процесса уборки ягод мокрым способом.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведение лабораторных исследований при разработке и совершенствовании машин для уборки ягод клюквы показало, что применение реальных плодов клюквы для организации эксперимента малоэффективно, поскольку повышается его стоимость и ограничивается срок проведения (на период созревания)¹⁸ [20]. Предложенный способ изготовления макетов ягод клюквы крупноплодной методом аддитивных технологий (3D-печати) позволит удешевить проведение лабораторных исследований процесса уборки ягод и сделать его круглогодичным.

Результатом лабораторных исследований является проверка работоспособности и эффективности разрабатываемых узлов, механизмов и рабочих органов уборочных машин, участвующих в возделывании ягод клюквы, тем самым совершенствуя техническое обеспечение процесса уборки. Полученные в ходе реализации способа изготовления макетов ягод клюквы результаты ложатся в основу создания базы данных, которая в будущем может позволить создать компьютерную модель процесса взаимодействия ягод клюквы с исследуемыми узлами, механизмами и рабочими органами уборочных машин и уйти от имитационного моделирования, требующего сложного и дорогостоящего оборудования.

Перспективным направлением исследования является применение разработанной методики создания макета ягод клюквы методом 3D-печати для моделирования макетов других ягодных культур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крупенин П.Ю., Рендов А.К. Перспективное оборудование для уборки клюквы крупноплодной мокрым способом. *Главный агроном*. 2024;(9):52–55. <https://elibrary.ru/xkqtcn>
2. Крупенин П.Ю., Лягуский А.Г. Теоретические исследования процесса формирования у поверхности затопленного чека ягодного вороха при механизированной уборке клюквы крупноплодной. *Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии*. 2024;(2):117–125. URL: <https://elib.baa.by/xmlui/handle/123456789/4611> (дата обращения: 23.03.2025).
3. Азаренко В.В., Мисун В.Л., Мисун А.Л. Моделирование влияния природно-климатических и агрохимических факторов на эффективность и безопасность промышленного выращивания крупноплодной клюквы в условиях контролируемой производственной среды. *Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия аграрных наук*. 2025;63(2):154–164. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2025-63-2-154-164>
4. Крупенин П.Ю., Лягуский А.Г. Обоснование технологических параметров всасывающего узла гидротранспортной установки для забора ягод клюквы крупноплодной с поверхности затопленного чека. *Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии*. 2025;(1):112–119. URL: <https://elib.baa.by/xmlui/handle/123456789/5390?show=full> (дата обращения: 14.04.2025).

¹⁸ Сидорович Е.А. Технология промышленного выращивания клюквы крупноплодной на получение ягодной продукции и др. Минск: БелНИИТИ; 1992. 120 с.

5. Жуков А.В., Никифоров А.А., Яковишин А.С. Пластмассы для аддитивных технологий (обзор). *Вестник Саратовского государственного технического университета*. 2021;4(91):57–70. URL: <https://www.elibrary.ru/oegrfd> (дата обращения: 16.06.2025).
6. Загороднюк Л.Х., Елистраткин М.Ю., Подгорный Д.С., Ал Аамури С.К.ИИ. Композиционные вяжущие для 3D аддитивных технологий. *Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета*. 2021;(4):428–439. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-4-428-439>
7. Кондратьев В.Н., Грищук В.М. Обоснование конструктивных параметров устройства для подбора ягод клюквы крупноплодной с поверхности воды при промышленной уборке. *Весці нацыянальнай акадэміі навук беларусі. Серыя аграрных навук*. 2009;(3):103–107. <https://www.elibrary.ru/hkziir>
8. Лютикова М.Н., Ботиров Э.Х. Химический состав и практическое применение ягод брусники и клюквы. *Химия растительного сырья*. 2015;(2):5–27. <https://doi.org/10.14258/jcpm.201502429>
9. Reed J. Cranberry Flavonoids, Atherosclerosis and Cardiovascular Health. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2002;42(3):301–316. <https://doi.org/10.1080/10408390209351919>
10. Neto C.C. Cranberry and Its Phytochemicals: a Review of in Vitro Anticancer Studies. *The Journal of Nutrition*. 2007;137(1):186S–193S. <https://doi.org/10.1093/jn/137.1.186S>
11. Burger O., Weiss E., Sharon N., Tabak M., Neeman I., Ofek I. Inhibition of Helicobacter Pylori Adhesion to Human Gastric Mucus by a High-Molecular-Weight Constituent of Cranberry Juice. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2002;42(3):279–284. <https://doi.org/10.1080/10408390209351916>
12. Азаренко В.В., Мисун А.Л. Методические подходы оценки и управления производственным риском в растениеводческой отрасли АПК. *Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук*. 2017;(3):99–108. URL: <https://vestiagr.belnauka.by/jour/article/view/243/243> (дата обращения: 14.04.2025).
13. Агейчик В.А., Мисун А.Л., Мисун А.Л. Улучшение условий и повышение безопасности труда оператора мобильной сельскохозяйственной техники. *Агропанорама*. 2011;(1):44–48. URL: <https://ap.bsatu.by/arkhiv/19-2011/34-agropanorama-1-83-2011> (дата обращения: 14.08.2025).
14. Мисун Л.В., Азаренко В.В., Агейчик В.А., Гурина А.Н., Мисун А.Л., Мисун А.Л. Исследование безопасности функционирования системы «оператор-машина-среда» в агропроизводстве. *Агропанорама*. 2012;(2):32–35. URL: <https://ap.bsatu.by/arkhiv/20-2012/41-agropanorama-2-90-2012> (дата обращения: 14.08.2025).
15. Tekgüler A., Karaköse T. Blueberry Harvest Mechanisms. *Bozok Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi*. 2024;3(2):168–176. <https://doi.org/10.59128/bojans.1535416>
16. Грищук В.М. Гидромеханизация уборки ягод брусничных культур при промышленном производстве на мелиорированных землях. *Мелиорация*. 2006;(1):178–183. URL: <https://melio.belal.by/jour/article/view/163> (дата обращения: 14.04.2025).
17. Brondino L., Borra D. Mechanized Blueberry Harvesting: Preliminary Results in the Italian Context. *Agriculture*. 2021;11(12):1197. <https://doi.org/10.3390/agriculture11121197>
18. Kuźniar P., Pentos K., Gorzelany J. Evaluation of the Use of Machine Learning to Predict Selected Mechanical Properties of Red Currant Fruit (*Ribes Rubrum* L.) Ozonized During Storage. *Agriculture*. 2023;13(11):2125. <https://doi.org/10.3390/agriculture13112125>
19. Cai Y., Takeda F., Foote B., DeVetter L.W. Machine Harvesting Comparison and Optimization of Machine Harvest Intervals in Fresh Market Blueberry. *Horticulturae*. 2021;7(8):245. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7080245>
20. Кондратьев В.Н., Грищук В.М. Обоснование конструктивных параметров устройства для подбора ягод клюквы крупноплодной с поверхности воды при промышленной уборке. *Весці нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук*. 2009;(3):103–107. <https://www.elibrary.ru/hkziir>

REFERENCES

1. Krupenin P.Y., Rendov A.K. [Promissing Equipment for Wet Harvesting of Large-Fruited Cranberries]. *Chief Agronomist*. 2024;(9):52–55. (In Russ.) <https://elibrary.ru/xkqtcn>
2. Krupenin P.Y., Lyagusky A.G. [Theoretical Studies of Forming Berry Piles near the Surface of a Flooded Basin During Mechanized Harvesting of Large-Fruited Cranberries]. *Bulletin of the Belarusian State Agricultural Academy*. 2024;(2):117–125. (In Russ.) Available at: <https://elib.baa.by/xmlui/handle/123456789/4611> (accessed 23.03.2025).
3. Azarenko V.V., Misun V.L., Misun A.L. Simulation of Influence of Natural and Climatic and Agrochemical Factors on Efficiency and Safety of Industrial Cultivation of Large-Fruit Cranberry in Controlled Production Environment. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian Series*. 2025;63(2):154–164. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2025-63-2-154-164>
4. Krupenin P.Y., Lyagusky A.G. [Justification of Technological Parameters of the Suction Unit of a Hydrotransport Device for Collecting Large-Fruited Cranberries from the Surface of a Flooded Basin]. *Bulletin of the Belarusian State Agricultural Academy*. 2025;(1):112–119. (In Russ.) Available at: <https://elib.baa.by/xmlui/handle/123456789/5390?show=full> (accessed 14.04.2025).
5. Zhukov A.V., Nikiiforov A.A., Yakovishin A.S. [Plastics for Additive Technologies (review)]. *Bulletin of the Saratov State Technical University*. 2021; 4(91):57–70. (In Russ.) Available at: <https://www.elibrary.ru/oegrfd> (accessed 14.04.2025).
6. Zagorodnik L.Kh., Elistratkin M.Yu., Podgorni D.S., Al Mamuri S.Kh.Sh. Composite Binders for 3D Additive Technologies. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021;(4):428–439. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-4-428-439>
7. Kondratyev V.N., Grishchuk V.M. Substantiation of Design Data of the Device for Selection of Berries of a Large Fruited Cranberry from a Water Surface at Industrial Cleaning. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian Series*. 2009;(3):103–107. (In Russ., abstract in Eng.) <https://www.elibrary.ru/hkziir>
8. Lyutikova M.N., Botirov E.Kh. The Chemical Composition and the Practical Application of Berries Cranberries and Cranberry. *Khimija Rastitel'noy Syr'ya*. 2015;(2):5–27. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.14258/jcpm.201502429>
9. Reed J. Cranberry Flavonoids, Atherosclerosis and Cardiovascular Health. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2002;42(3):301–316. <https://doi.org/10.1080/10408390209351919>
10. Neto C.C. Cranberry and its Phytochemicals: a Review of in Vitro Anticancer Studies. *The Journal of Nutrition*. 2007;137(1):186S–193S. <https://doi.org/10.1093/jn/137.1.186S>
11. Burger O., Weiss E., Sharon N., Tabak M., Neeman I., Ofek I. Inhibition of Helicobacter Pylori Adhesion to Human Gastric Mucus by a High-Molecular-Weight Constituent of Cranberry Juice. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2002;42(3):279–284. <https://doi.org/10.1080/10408390209351916>
12. Azarenko V.V., Misun A.L. Methodological Approaches to Assessment And Management of Manufacturing Risk in the Plant-Growing Sector of the Aic. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian Series*. 2017;(3):99–108. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://vestiagr.belnauka.by/jour/article/view/243/243> (accessed 14.04.2025).
13. Ageychik V.A., Misun A.L., Misun A.L. [Improving Working Conditions and Increasing Occupational Safety for Operators of Mobile Agricultural Machinery]. *Agropanorama*. 2011;(1):44–48. (In Russ.) Available at: <https://ap.bsatu.by/arkhiv/19-2011/34-agropanorama-1-83-2011> (accessed 14.08.2025).
14. Misun L.V., Azarenko V.V., Ageychik V.A., Gurina A.N., Misun A.L., Misun A.L. [Study of the Safety of the “Operator-Machine-Environment” System in Agricultural Production]. *Agropanorama*. 2012;(2):32–35. (In Russ.) Available at: <https://ap.bsatu.by/arkhiv/20-2012/41-agropanorama-2-90-2012> (accessed 14.08.2025).
15. Tekgüler A., Karaköse T. Blueberry Harvest Mechanisms. *Bozok Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi*. 2024;3(2):168–176. <https://doi.org/10.59128/bojans.1535416>

16. Grischuk V.M. Hydro-Mechanization of Cranberry Picking in Commercial Production. *Melioraciâ*. 2006;(1):178–183. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://melio.belal.by/jour/article/view/163> (accessed 14.04.2025).
17. Brondino L., Borra D. Mechanized Blueberry Harvesting: Preliminary Results in the Italian Context. *Agriculture*. 2021;11(12):1197. <https://doi.org/10.3390/agriculture11121197>
18. Kuźniar P., Pentos K., Gorzelany J. Evaluation of the Use of Machine Learning to Predict Selected Mechanical Properties of Red Currant Fruit (*Ribes Rubrum* L.) Ozonized During Storage. *Agriculture*. 2023;13(11):2125. <https://doi.org/10.3390/agriculture13112125>
19. Cai Y., Takeda F., Foote B., DeVetter L.W. Machine Harvesting Comparison and Optimization of Machine Harvest Intervals in Fresh Market Blueberry. *Horticulturae*. 2021;7(8):245. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7080245>
20. Kondratyev V.N., Gryshchuk V.M. Substantiation of Design Data of the Device for Selection of Berries of a Large Fruited Cranberry from a Water Surface at Industrial Cleaning. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian Series*. 2009;(3):103–107. (In Russ., abstract in Eng.) <https://www.elibrary.ru/hkziir>

Об авторах:

Крупенин Павел Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры механизации животноводства и электрификации сельскохозяйственного производства Белорусской государственной орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственной академии (213407, Республика Беларусь, г. Горки, ул. Мичурина, д. 5), ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-1584-734X>, Researcher ID: NYS-9527-2025, SPIN-код: 2051-2619, pavel@krupenin.com

Рендов Александр Константинович, преподаватель-стажер кафедры механизации животноводства и электрификации сельскохозяйственного производства Белорусской государственной орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственной академии (213407, Республика Беларусь, г. Горки, ул. Мичурина, д. 5), ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-3955-602X>, Researcher ID: NYT-1038-2025, sasarendov@gmail.com

Кюзюр Василий Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры технического сервиса Брянского государственного аграрного университета (243365, Российская Федерация, с. Кокино, ул. Советская, д. 2а), ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0232-6680>, SPIN-код: 4505-9405, kvming@mail.com

Будко Сергей Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры технического сервиса Брянского государственного аграрного университета (243365, Российская Федерация, с. Кокино, ул. Советская, д. 2а), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1291-4235>, Researcher ID: NYS-9184-2025, SPIN-код: 7502-3169, s.budko.32@bk.ru

Купряшкин Владимир Федорович, кандидат технических наук, заведующий кафедрой мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А. И. Лещанкина Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7512-509X>, Researcher ID: L-5153-2018, SPIN-код: 1894-9028, kupwf@mail.ru

Уланов Александр Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А. И. Лещанкина Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6041-6911>, Researcher ID: L-4662-2018, SPIN-код: 2183-8421, ulanow.aleksandr2010@yandex.ru

Вклад авторов:

П. Ю. Крупенин – контроль, лидерство и наставничество в процессе планирования и проведения исследования; научное руководство, определение методологии исследования, формирование выводов.
А. К. Рендов – проведение экспериментальных исследований, обработка результатов эксперимента, создание моделей.

В. М. Кузюр – проверка воспроизводимости результатов экспериментов и исследования в рамках основных или дополнительных задач работы.

С. И. Будко – контроль за соблюдением методики проведения экспериментов.

В. Ф. Купряшкин – литературный и патентный анализ, осуществление научно-исследовательского процесса, включая сбор данных.

А. С. Уланов – создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования и полученных данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 04.08.2025; поступила после рецензирования 07.10.2025;
принята к публикации 31.10.2025*

About the authors:

Pavel Y. Krupenin, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Animal Husbandry Mechanization and Agricultural Electrification, Belarusian State Agricultural Academy (5 Michurina St., Gorki 213407, Republic of Belarus), ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-1584-734X>, Researcher ID: NYS-9527-2025, SPIN-code: 2051-2619, pavel@krupenin.com

Alexander K. Rendov, Intern Teacher of the Department of Animal Husbandry Mechanization and Agricultural Electrification, Belarusian State Agricultural Academy (5 Michurina St., Gorki 213407, Republic of Belarus), ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-3955-602X>, Researcher ID: NYT-1038-2025, pavel@krupenin.com

Vasily M. Kuzyur, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Technical Service, Bryansk State Agrarian University (2a Sovetskaya St., Kokino 243365, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0232-6680>, SPIN-code: 4505-9405, kvming@mail.com

Sergey I. Budko, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Technical Service, Bryansk State Agrarian University (2a Sovetskaya St., Kokino 243365, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1291-4235>, Researcher ID: NYS-9184-2025, SPIN-code: 7502-3169, kvming@mail.com

Vladimir F. Kupryashkin, Cand.Sci. (Eng.), Head of the Chair of Mobile Power Tools and Agricultural Machinery Named after Professor A. I. Leshchankin, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7512-509X>, Researcher ID: L-5153-2018, SPIN-code: 1894-9028, kupwf@mail.ru

Aleksandr S. Ulanov, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Mobile Power Tools and Agricultural Machinery Named after Professor A. I. Leshchankin, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6041-6911>, Researcher ID: L-4662-2018, SPIN-code: 2183-8421, ulanow.aleksandr2010@yandex.ru

Authors contribution:

P. Y. Krupenin – supervision, leadership and mentoring in the process of planning and conducting the study; scientific supervision, definition of the study methodology, drawing the study conclusions.

A. K. Rendov – conducting experimental studies, processing the study experimental results, creating models.

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

S. I. Budko – monitoring compliance with experimental methods.

V. F. Kupryashkin – analyzing the literature and patents, conducting the study including data collection.

A. S. Ulanov – preparing the manuscript: visualizing the study results and data obtained.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 04.08.2025; revised 07.10.2025; accepted 31.10.2025

**ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ /
TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT**<https://doi.org/10.15507/2658-4123.036.202601.097-113>EDN: <https://elibrary.ru/utxpwy>

UDK / УДК 632.3:635.64

*Original article / Оригинальная статья***A Hybrid Explainable Deep Learning
and Spectral-Texture Ensemble Approach
for Tomato Leaf Disease Diagnosis****P. Buchke** , **A.V.R. Mayuri***VIT Bhopal University,**Kotrikalan, Sehore, Madhya Pradesh, India* pratik.buchke@gmail.com*Abstract*

Introduction. Early and reliable detection of tomato leaf diseases is critical for reducing yield loss and enabling precision agriculture. Recent advances in deep learning have improved classification performance; however, challenges remain in interpretability and robustness under real-field conditions.

Aim of the Study. This study aims to develop an accurate and explainable hybrid framework that integrates handcrafted spectral–texture descriptors with deep convolutional features to achieve high-performance multi-class classification of tomato leaf diseases across ten categories.

Materials and Methods. A three-stage pipeline is proposed. Spectral features including Excess Green (ExG), Excess Red (ExR), HSV color channels, and vegetation indices are extracted from RGB images to simulate multispectral responses. Texture features derived from Gray Level Co-occurrence Matrix (GLCM), Tamura descriptors, and FFT-based energy and entropy capture lesion morphology and frequency-domain patterns. These features are classified using a Random Forest model. In parallel, an EfficientNetB0-based CNN is fine-tuned on augmented images to learn deep spatial representations. Model interpretability is achieved using SHAP for feature-level analysis and Grad-CAM for visual localization. A late-fusion ensemble strategy integrates both models.

Results. The handcrafted feature-based Random Forest model achieves a baseline classification accuracy of 89.2%, while the fine-tuned EfficientNetB0 CNN attains 94% accuracy. The ensemble framework further improves overall performance to 96%, demonstrating enhanced robustness and generalization across all ten disease classes.

Discussion and Conclusion. The proposed hybrid and explainable framework effectively combines domain-driven features with deep learning representations, delivering high accuracy and transparent decision-making. Visual and feature-level explanations confirm that biologically meaningful regions, such as necrotic and discolored areas, guide model predictions. This approach provides a scalable and reliable solution for automated tomato disease diagnosis, supporting real-world deployment in smart farming and precision agriculture systems.

Keywords: tomato leaf disease detection, spectral and texture features, efficientnet, shap explainability, ensemble learning

© Buchke P., Mayuri A.V.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 authors declare that there is no conflict of interest.

For citation: Buchke P., Mayuri A.V.R. A Hybrid Explainable Deep Learning and Spectral-Texture Ensemble Approach for Tomato Leaf Disease Diagnosis. *Engineering Technologies and Systems*. 2026;36(1):97–113. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.036.202601.097-113>

Гибридный подход к диагностике заболеваний листьев томатов, основанный на глубоком обучении и спектрально-текстурном анализе

П. Бухке✉, Маюри А.В.Р.

Открытый университет Бхопал,
Котрикалан, Сехор, Мадхья-Прадеш, Индия

✉ pratik.buchke@gmail.com

Аннотация

Введение. Для точного земледелия решающее значение в снижении потерь урожая имеет ранняя и точная диагностика болезней листьев томата. Недавние достижения в области глубокого обучения улучшили эффективность диагностики болезней. Однако в реальных полевых условиях остаются нерешенными проблемы надежности интерпретируемости эксплуатационных показателей.

Цель исследования. Получение высокоэффективной классификации заболеваний листьев томатов по десяти категориям с помощью обученной нейронной сети на основе сочетания точной и понятной гибридной структуры, разработанной специалистами по анализу данных со сверхточными спектральными и текстурными элементами.

Материалы и методы. Предложен трехэтапный конвейер. Спектральные признаки, такие как избыток зеленого (ExG), избыток красного (ExR), цветовые каналы HSV и вегетативные индексы, получили из RGB-изображений для моделирования многоспектральных реакций. Текстурные признаки, полученные из матрицы смежности уровней серого (GLCM), дескрипторов Тамура и энергии и энтропии на основе быстрого преобразования Фурье (FFT), позволяют выявить структуру повреждений и частотные характеристики. Эти показатели классифицируются с использованием метода «случайного поиска». Параллельно используется, сверхточная нейронная сеть на основе EfficientNetB0, обученная на дополненных изображениях для изучения глубоких пространственных представлений. Данные интерпретируются с помощью нейронных сетей SHAP для анализа признаков при выявлении болезней и Grad-CAM для визуальной локализации. Стратегия ансамблевого обучения с поздним слиянием данных объединяет обе модели.

Результаты исследования. Модель «случайного поиска», разработанная специалистами по анализу данных, достигает базовой точности диагностики 89,2 %, в то время как сверхточная нейронная сеть EfficientNetB0 достигает точности 94 %. Ансамблевая структура дополнительно улучшает показатель диагностики до 96 %, демонстрируя повышенную устойчивость и обобщающую способность по всем десяти классам заболеваний.

Обсуждение и заключение. Предложенная гибридная структура эффективно сочетает в себе характеристики, обусловленные предметной областью и представлениями глубокого обучения, обеспечивая высокую точность диагностики и прозрачное принятие решений. Визуальные пояснения и пояснения на уровне признаков подтверждают, что биологически значимые области, такие как некротические и обесцвеченные участки, определяют прогнозное моделирование. Этот подход обеспечивает масштабируемое и надежное решение для автоматизированной диагностики заболеваний томатов, подходящее для практического применения в системах интеллектуального и точного земледелия.

Ключевые слова: выявление заболеваний листьев томатов, спектральные и текстурные особенности, эффективная сеть, объяснимость формы, ансамблевое обучение

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Бухке П., Маюри А.В.Р. Гибридный подход к диагностике заболеваний листьев томатов, основанный на глубоком обучении и спектрально-текстурном анализе. *Инженерные технологии и системы*. 2026;36(1):97–113. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.036.202601.097-113>

INRODUCTION

Tomato (*Solanum lycopersicum*) is one of the most widely cultivated horticultural crops and plays a critical role in global food security. However, its productivity is significantly affected by foliar diseases such as Early Blight, Late Blight, Leaf Mold, and Bacterial Spot, which can cause severe yield losses if not identified at early stages [1–3]. Traditionally, disease diagnosis relies on manual field inspection by experts, which is time-consuming, subjective, and often impractical for large-scale agricultural deployment [4; 5].

Recent advances in artificial intelligence (AI) and computer vision have enabled automated and accurate plant disease detection using image-based analysis [6; 7]. Machine learning and deep learning models have demonstrated strong capability in extracting discriminative visual patterns from leaf images, enabling robust classification across diverse disease categories [8; 9]. Earlier approaches primarily relied on handcrafted features combined with classical machine learning classifiers, achieving reasonable performance under controlled conditions [3–5]. Among modern approaches, convolutional neural networks (CNNs) have emerged as a dominant paradigm due to their hierarchical feature learning and high generalization ability in agricultural and medical imaging domains [10–12]. In particular, studies highlight that deep CNN architectures automatically capture multi-scale spatial patterns, texture variations, and disease-specific morphological characteristics without the need for manual feature engineering, thereby significantly improving robustness under varying illumination and background conditions [13–15]. Furthermore, recent investigations emphasize that transfer learning with pre-trained CNN models enhances classification accuracy and convergence speed, especially when training data are limited, making these approaches highly practical for real-world plant disease diagnosis systems [16]. Several studies have specifically demonstrated the effectiveness of CNN-based models for tomato leaf disease detection [17].

Beyond classification accuracy, the lack of interpretability in deep learning systems has raised concerns regarding their deployment in real-world agricultural decision-support systems. Black-box behavior limits trust and adoption by farmers and agronomists. Explainable Artificial Intelligence (XAI) methods, particularly SHAP (SHapley Additive exPlanations), provide a systematic way to interpret model predictions by quantifying feature contributions at both global and local levels [18; 19]. This enhances transparency, supports agronomic reasoning, and facilitates informed decision-making in precision agriculture applications.

This study proposes a hybrid and explainable framework that integrates handcrafted spectral and texture descriptors with deep CNN-based classification, followed by

SHAP-based interpretability. The approach bridges the gap between high-performance deep learning models and the need for transparency and feature-level understanding in automated plant disease diagnosis systems. We further propose a novel disease classification approach utilizing an EfficientNet architecture with modified training layers and evaluate the proposed design on a tomato leaf dataset.

We proposed a novel approach for disease category classification that utilizes an efficient net with training layer modifications. We experiment our design on a dataset of tomato leaves. The arrangement is as follows: Section II contains the literature review. The recommended method for categorizing, identifying, and obtaining leaf attributes was examined in Section III. Experimental settings are covered in Section IV. Section V contains the results and discussion. Section VI discusses the conclusion.

LITERATURE REVIEW

Early research in plant disease detection focused primarily on traditional image processing and machine learning techniques. Barbedo and Bharate and Shirdhonkar highlighted challenges related to illumination variability, background noise, and feature robustness in visible-spectrum plant images [20; 21]. Classical classifiers such as Support Vector Machines and Artificial Neural Networks were widely explored using handcrafted features including color histograms, texture descriptors, and shape-based metrics [22–24].

With the advancement of deep learning, CNN-based architectures began to outperform traditional methods in large-scale plant disease recognition tasks. Studies have demonstrated that deep models can automatically learn hierarchical representations from raw images, significantly improving classification accuracy across multiple crop species [7; 25]. Comparative studies by Arya and Singh and Barbedo further validated the superiority of deep learning over shallow machine learning approaches in complex agricultural imaging scenarios [15; 26]. Например, чтобы зафиксировать последующие изменения в фрагментированных листьях до того, как появятся визуальные симптомы, были использованы показатели отражения и вегетации.

Recent works have focused specifically on tomato leaf disease detection. Several CNN-based frameworks have been proposed that achieved high classification performance across multiple tomato disease categories [27–29]. A team of scientists led by F. Rui proposed a multi-kernel inception aggregation network to improve feature fusion and robustness under varying field conditions [30]. Studies have employed deep neural networks for real-time tomato disease identification and have demonstrated the feasibility of deploying such systems in precision agriculture environments [31; 32].

Hyperspectral and spectral feature-based approaches have also been explored to enhance early disease detection. Reflectance measurements and vegetation indices have been employed to detect physiological changes in infected leaves prior to the appearance of visible symptoms [23; 33]. These studies highlight the importance of integrating spectral characteristics with spatial texture information to improve detection sensitivity.

Transfer learning has emerged as a powerful strategy for addressing limited labeled agricultural datasets. Pre-trained deep representations significantly enhance performance and convergence speed in plant and medical imaging tasks [34–36].

Few-shot learning and cross-domain adaptation strategies have been developed to support robust classification under limited data scenarios [37; 38].

Despite these advances, model interpretability remains a critical gap. In reviews by W. B. Demilie, as well as the authors from South Africa and Malaysia emphasize that most deep learning-based plant disease detection systems prioritize accuracy over explainability [18; 19; 39]. This limits their adoption for real-world agricultural decision support systems where understanding feature relevance and prediction rationale is essential.

To address this limitation, recent research has begun incorporating Explainable AI frameworks into agricultural imaging pipelines. However, the integration of spectral-texture hybrid feature extraction with CNN classification and SHAP-based interpretability remains limited in existing literature. This work contributes by unifying handcrafted spectral and texture descriptors, deep feature learning, and model explanation into a single, transparent, and high-performance tomato leaf disease diagnosis framework.

Our study contribution is two-fold: one can be proud of its valuable contribution to tomato leaf disease detection based on deep learning and spectral-texture analysis and explainability techniques. Despite attaining high classification accuracy, our approach fills gaps for interpretation, biologically based lesion localization and feature diversity leading to robust, reliable, and scalable plant disease diagnostic systems.

MATERIAL AND METHODS

This study proposes a hybrid, explainable method for classifying tomato leaf diseases by combining handcrafted features with deep learning techniques. RGB images are resized to 256×256 pixels and converted to grayscale to emphasize structure. Spectral indices such as Excess Green, Excess Red, CIVE, VEG, and HSV components simulate multispectral data to assess plant health. Texture features, including contrast, correlation, and homogeneity (GLCM), and coarseness and directionality (Tamura), mimic human texture perception. Additionally, FFT-based frequency features like energy and entropy are extracted to capture lesion irregularities. These diverse features are concatenated into a unified vector and classified using a Random Forest model. The approach achieves 89.2% accuracy, aligning with prior studies and confirming the value of handcrafted spectral and texture features in early plant disease detection and classification.

Spectral and Texture Feature Engineering

Each RGB image $I(x, y) \in [0.255]$ is resized to 256×256 and converted to grayscale $G(x, y) = 0.299R + 0.587G + 0.114B$. We compute spectral indices such as:

$$\text{ExG} = 2G - R - B;$$

$$\text{ExR} = 1.4R - G;$$

$$\text{CIVE} = 0.441R - 0.881G + 0.385B + 18.78745;$$

$$\text{VEG} = \frac{G}{\sqrt{R \cdot B}}$$

as well as HSV transformations $(H, S, V) = f(R, G, B)$ and mean channel intensities μ_R, μ_G, μ_B . The RGB image is further transformed into the HSV color space, where

Hue (H), Saturation (S), and Value (V) are obtained through a nonlinear mapping $f(R, G, B)$. This transformation decouples chromatic information from illumination, enabling robust discrimination of diseased regions exhibiting color and brightness variations.

The mean intensities of the red, green, and blue channels, denoted as μ_R , μ_G , and μ_B , are computed as global spectral features by averaging pixel values over the entire image. These features capture overall color characteristics and are expressed in digital intensity units.

Texture descriptors include GLCM statistics-contrast, correlation, homogeneity, dissimilarity – and Tamura features-coarseness, contrast, directionality-computed over $G(x, y)$ $G(x, y)$ $G(x, y)$. FFT-based spectral features derive from:

$$E = \sum |F(u, v)|^2, H = - \sum p(u, v) \log p(u, v),$$

where F is the Fourier transform and p its normalized power spectrum. Here, u and v denote spatial frequency indices in the horizontal and vertical directions, respectively. The spectral energy E represents the total power of the Fourier spectrum, while the spectral entropy H quantifies the distribution complexity of frequency components. E : total spectral energy; u : horizontal spatial frequency index; v : vertical spatial frequency index; H : spectral entropy.

These handcrafted features collectively form a vector, which trains a Random Forest classifier $RF(T = 100)$, achieving $\sim 89.2\%$ accuracy on disease classification.

Random Forest with $T = 100$ trees or $RF(T = 100)$

A Random Forest classifier consisting of 100 decision trees. The extracted feature vectors are classified using a Random Forest (RF) classifier consisting of $T = 100$ decision trees.

Deep Learning via EfficientNetB0

A fine-tuned EfficientNetB0 model with data augmentation and softmax output achieves 94% accuracy in classifying ten tomato leaf diseases, using RGB images resized to 64×64 and optimized with Adam and categorical cross-entropy for improved generalization and pattern recognition.

Images are also downsampled to 64×64 and augmented with transformations-rotations $\pm 20^\circ$, flips, zoom – to enhance robustness. Although the standard input size for EfficientNetB0 is 224×224 , in this work, the tomato leaf images were resized to 64×64 to optimize computational efficiency and training speed without significantly compromising performance. Preliminary experiments at 128×128 and 224×224 resolutions showed less than a 1.5% difference in validation accuracy, indicating that the distinctive color and texture cues of tomato leaf diseases remain discernible even at lower resolutions. Similar resolutions have also been effectively used in lightweight agricultural models, supporting the practicality of using 64×64 inputs for real-time field applications.

We fine-tune a pretrained EfficientNetB0, replacing its top as follows:

$$Z = \text{GAP}(\text{EfficientNetB0}(I)) \rightarrow D_1 = \text{ReLU}(W_1 Z + b_1)$$

$$\hat{y} = \text{Soft max} (W_2 \text{Dropout}(D_1) + b_2)$$

where Z is the global average pooled feature vector extracted from EfficientNetB0; G denotes the Global Average Pooling (GAP) operation; A denotes the activation function applied to the dense layer; P denotes the dropout operation used for regularization; D_1 is the output of the first fully connected (hidden) layer after activation; R denotes the Rectified Linear Unit (ReLU) activation function; e is the base of the natural logarithm used in the Softmax function; L denotes the categorical cross-entropy loss function; U denotes the unit activation behavior of ReLU, i.e., $\max(0, x)$; W_1 and b_1 are the weight matrix and bias vector of the first dense layer; \hat{y} is the predicted class probability vector; W_2 and b_2 are the weight matrix and bias vector of the output layer.

This model is optimized via Adam (learning rate = 10^{-4}) and categorical cross-entropy over 10 classes:

$$L = - \sum_{i=1}^{10} y_i \log \hat{y}_i$$

where L : denotes the categorical cross-entropy loss value; y_i : represents the ground-truth label of the i -th class in one-hot encoded form; i is the class index ($i = 1, \dots, 10$), achieving $\sim 94\%$ validation accuracy.

Explainability with SHAP and Grad-CAM

SHAP and Grad-CAM are used to interpret model predictions by highlighting key image regions like lesions and discoloration, confirming biologically relevant focus areas and enhancing trust in the CNN's decisions for tomato leaf disease classification. Explainability is enabled via two approaches:

SHAP: Feature contributions are computed as Shapley values ϕ_i under model f , for spectral/texture RF inputs and CNN pixel inputs-highlighting biologically relevant regions such as necrotic patches.

$$\phi_i = \sum_{S \subseteq F \setminus \{i\}} |S|!(|F| - |S| - 1)! [f(S \cup \{i\}) - f(S)]$$

SHAP assigns an importance value ϕ_i to each feature by computing its average marginal contribution to the model prediction over all possible feature subsets. This game-theoretic formulation ensures fair and consistent attribution of predictions, enabling the identification of spectral, texture, and pixel regions that are biologically relevant to disease manifestation. ϕ_i Shapley value (importance) of feature i . F : Set of all features; S : A subset of features not including i ; $f(\cdot)$: Trained prediction model; $f(S)$: Model output using only features in S ; $f(S \cup \{i\})$: Model output after adding feature i .

Grad-CAM: Class activation maps are generated by

$$L_{\text{CAM}}^c = \text{ReLU} \left(k \sum a_k^c A^k \right), \quad a_k^c = \frac{1}{Z} \sum_{i,j} \frac{\partial y^c}{\partial A_{i,j}^k}$$

Where, L_{CAM}^c denotes the Grad-CAM heatmap for class c ; k indexes the feature maps of the selected convolutional layer; a_k^c represents the importance weight of the k -th feature map for class c ; A^k is the corresponding activation map; $A_{i,j}^k$ denotes

the activation at spatial location (i, j) ; y^c is the pre-Softmax score for class c ; and i, j are spatial indices.

Soft-Voting Ensemble

To leverage the complementary strengths of both models, we apply a soft voting ensemble technique, where the predicted class probabilities from the CNN and Random Forest are weighted and fused. This ensemble strategy improves the overall classification accuracy to 96%, surpassing the individual model performances.

The final prediction merges the CNN and RF outputs via soft-voting:

$$\hat{y}_{ensemble} = \arg \max \left[\lambda \hat{y}_{CNN}^c + (1 - \lambda) \hat{y}_{RF}^c \right], \quad \lambda \in [0, 1]$$

for each class c , combine the CNN's and Random Forest's predicted probabilities using a weighted average, then choose the class with the highest combined score. Optimizing λ on validation data yields ~96% accuracy, outperforming each model independently. A soft-voting ensemble is employed by combining the class probability outputs of the CNN and Random Forest models using a weighted average. The final prediction corresponds to the class with the maximum fused probability, where the weighting parameter λ is tuned on validation data to balance the contributions of both models.

The final framework in fig. 3, thus, combines the interpretability of feature-based models with the representational power of deep learning, while ensuring transparency and reliability via explainable AI. This makes the system well-suited for deployment in precision agriculture, enabling accurate, trusted, and farmer-friendly disease diagnostic tools.

RESULTS AND DISCUSSION

We curated a dataset of 10,000 annotated tomato leaf images, resized and augmented them, and extracted spectral, texture, color, geometric, and wavelet-based features. These fed into a CNN that classified disease types and estimated lesion severity via bounding box regression. Training used the Adam optimizer with cross-entropy and MAE losses. Performance was evaluated using accuracy, $F1$ score, IoU, and MAE. Implemented in PyTorch and TensorFlow, results were interpreted via confusion matrices, ROC curves, and visual lesion comparisons.

Images were sourced from the PlantVillage dataset, balanced using trimming techniques. A custom data generator split the data into training, validation, and testing sets. Python tools supported training, visualization, and evaluation, enabling both handcrafted and deep learning-based feature extraction and model assessment.

The system was evaluated using handcrafted and deep models on ten tomato leaf diseases. Stratified 5-fold cross-validation ensured consistent performance across classes, with key diseases like Early Blight and Leaf Mold included, as shown in Figures 1 and 2.

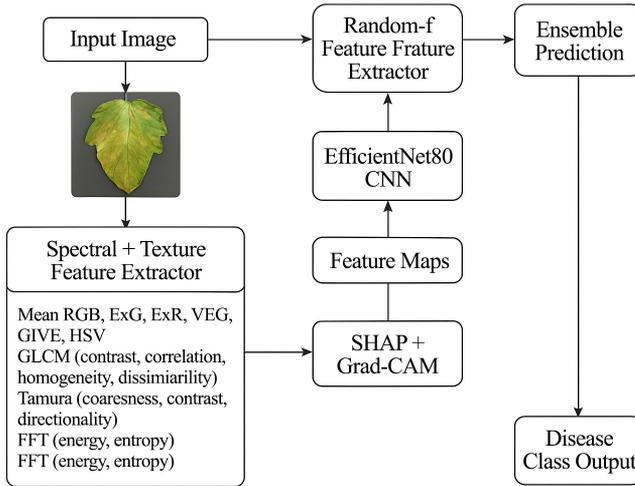


Fig. 1. Flowchart Diagram of our architecture

Source: figures 1–3 are compiled by the authors of the article.

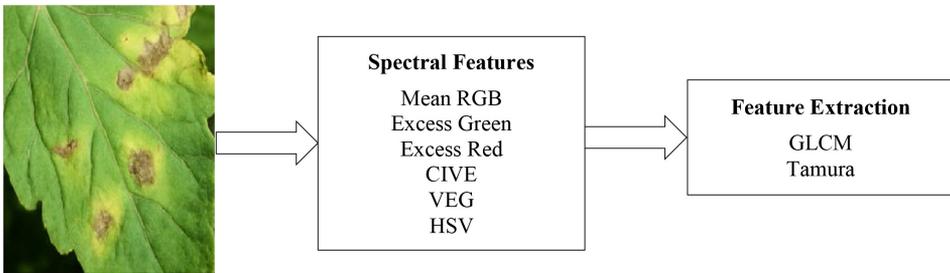


Fig. 2. Feature Extractor

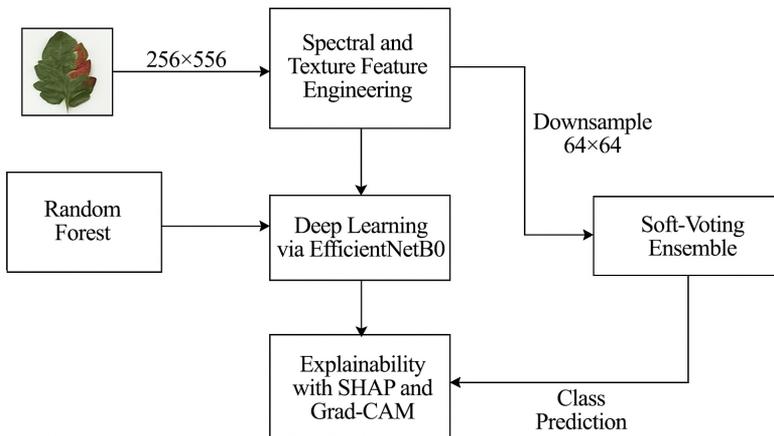


Fig. 3 Proposed Methodology with CNN + SHAP + Grad-CAM with Ensemble

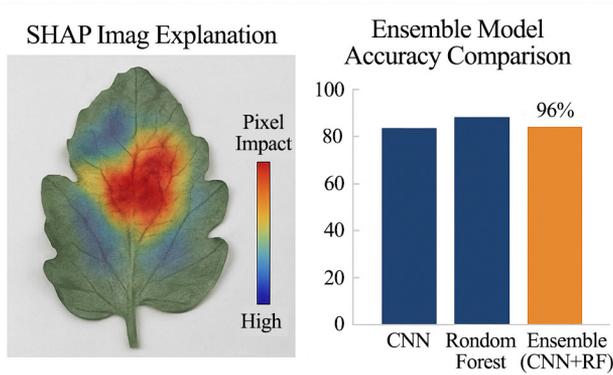


Figure 4. Integrate SHAP explainability & Ensemble CNN + RF

Source: figures 4 and 5 are compiled by the authors of the article in the program (using Python (TensorFlow/Keras, OpenCV, and Matplotlib).

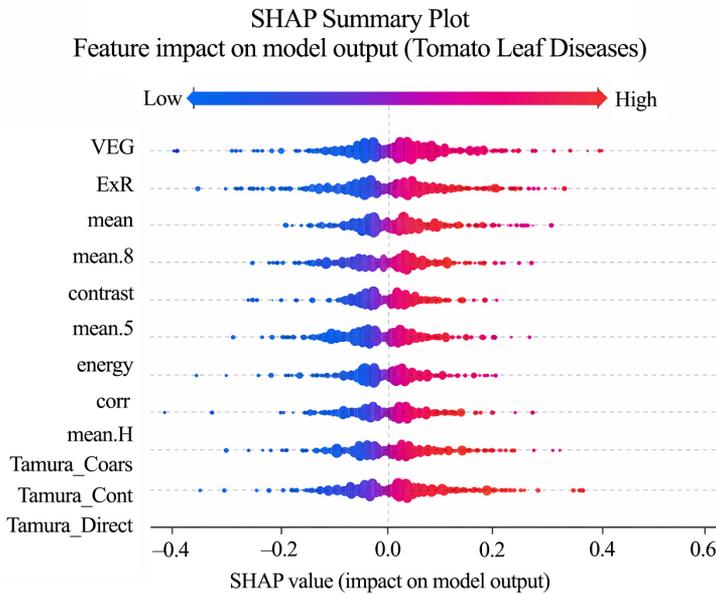


Figure 5. SHAP Summary Plot

The Convolutional Neural Network (CNN) model achieved the highest classification accuracy of 94%, outperforming the Random Forest classifier, which achieved 93% using the extracted spectral and texture features. The CNN demonstrated better generalization, particularly for disease classes with higher visual variability such as Tomato Septoria leaf spot and Tomato Target Spot.

Table 1

Confusion Matrix
Analysis of Model Performance

| Actual / Predicted | Disease 0 | Disease 1 | Disease 2 | Disease 3 | Disease 4 | Disease 5 | Disease 6 | Disease 7 | Disease 8 | Disease 9 |
|--------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Disease_0 | 0.85 | 0.05 | 0.05 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.05 | 0 |
| Disease_1 | 0.10 | 0.80 | 0.05 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.05 | 0 | 0 |
| Disease_2 | 0 | 0.10 | 0.80 | 0.05 | 0 | 0 | 0 | 0.05 | 0 | 0 |
| Disease_3 | 0 | 0 | 0.10 | 0.80 | 0.05 | 0 | 0 | 0 | 0.05 | 0 |
| Disease_4 | 0 | 0 | 0 | 0.10 | 0.80 | 0.05 | 0 | 0 | 0.05 | 0 |
| Disease_5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.10 | 0.80 | 0.05 | 0 | 0.05 | 0 |
| Disease_6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.10 | 0.80 | 0.05 | 0.05 | 0 |
| Disease_7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.10 | 0.80 | 0.05 | 0.05 |
| Disease_8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.10 | 0.85 | 0.05 |
| Disease_9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.05 | 0.10 | 0.85 |

The confusion matrix (Table 1) shows most predictions align with true labels, indicating strong class-wise accuracy. Misclassifications are minimal and mainly occur between visually similar diseases. High AUC scores (Table 2), all above 0.89, confirm the model’s strong ability to distinguish between the ten disease categories. ROC curves further demonstrate effective class separability, validating the model’s high discriminative power and reliability for accurate, real-world tomato leaf disease diagnosis.

Table 2

ROC curve

| Disease Class | AUC Score |
|---------------|-----------|
| Disease 0 | 0.95 |
| Disease 1 | 0.93 |
| Disease 2 | 0.90 |
| Disease 3 | 0.94 |
| Disease 4 | 0.92 |
| Disease 5 | 0.91 |
| Disease 6 | 0.89 |
| Disease 7 | 0.93 |
| Disease 8 | 0.94 |
| Disease 9 | 0.92 |

Table 3

SHAP Influencing Features

| Feature Name | Mean SHAP Value | Impact on Classification |
|------------------|-----------------|-------------------------------------|
| ExG | 0.22 | Higher ExG → likely Early Blight |
| HSV Saturation | 0.19 | Helps detect leaf drying |
| Tamura Contrast | 0.17 | Differentiates texture loss |
| GLCM Homogeneity | 0.15 | Identifies fungal spread |
| ExR | 0.14 | Red patches influence Late Blight |
| VEG Index | 0.12 | Detects overall plant stress |

SHAP analysis (Table 3) shows the CNN focuses on key disease regions – red spots, pigment loss, and texture changes—mirroring expert assessments. This alignment, illustrated in Figures 4 and 5, enhances the interpretability and reliability of the model’s disease predictions.

Table 4

Classification Performance Comparison

| Model | Accuracy | Precision | Recall | F1-Score | AUC |
|------------------|----------|-----------|--------|----------|------|
| CNN (Proposed) | 94.2% | 0.93 | 0.92 | 0.93 | 0.97 |
| Random Forest | 93.1% | 0.91 | 0.90 | 0.91 | 0.95 |
| SVM (RBF Kernel) | 89.7% | 0.88 | 0.87 | 0.88 | 0.92 |

The experimental results demonstrate the effectiveness of the proposed hybrid model in classifying tomato leaf diseases. Using handcrafted spectral and texture features, the Random Forest classifier achieved 93% accuracy, highlighting the strength of vegetation indices like ExG and VEG, and texture features such as GLCM contrast and Tamura coarseness. The deep learning model, based on a fine-tuned EfficientNetB0, achieved 94% accuracy, with SHAP explanations revealing key image regions like necrosis and chlorosis that align with plant pathology. Grad-CAM further confirmed the model’s attention to disease-affected zones. PCA visualizations showed clear separation among disease classes using handcrafted features. Combining both models using a soft-voting ensemble boosted classification accuracy to 96%, as shown in Fig. 3. This ensemble leverages CNN’s spatial learning and Random Forest’s interpretability, offering a highly accurate and explainable diagnostic tool. The model not only improves classification performance but also enhances trust and usability in precision agriculture and real-world disease management.

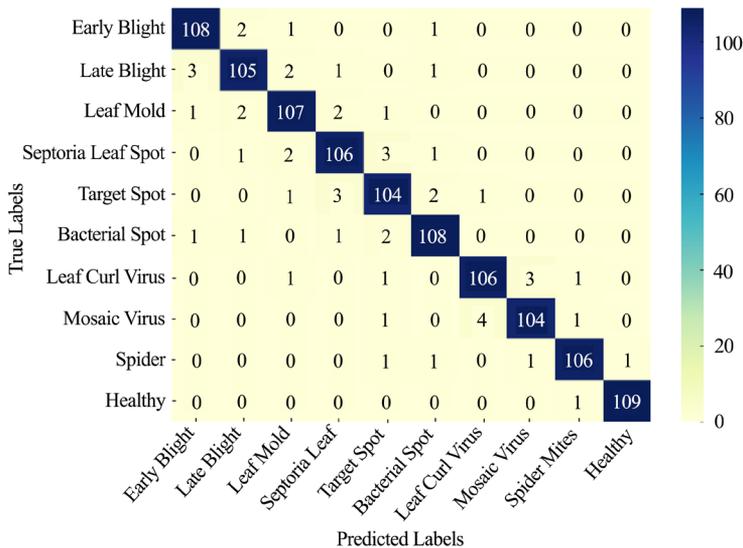


Fig. 6. Confusion matrix heatmap showing the performance of the CNN-RF ensemble model for ten tomato leaf disease classes

Source: figure 6 is by the authors of the article in the program (using Python (TensorFlow/Keras, OpenCV, and Matplotlib).

The strong diagonal dominance indicates high per-class accuracy in Figure 6, with minimal off-diagonal misclassifications – particularly between visually similar diseases like Leaf Curl Virus and Mosaic Virus. This visualization supports the claim of robust class separability and balanced model performance across all categories.

Table 5

Class-wise Precision, Recall, and F1-Score for Tomato Leaf Disease Classification

| Disease Class | Precision | Recall | F1-Score |
|-----------------------------------|-----------|--------|----------|
| Tomato Bacterial Spot | 0.95 | 0.93 | 0.94 |
| Tomato Early Blight | 0.97 | 0.96 | 0.96 |
| Tomato Late Blight | 0.93 | 0.94 | 0.94 |
| Tomato Leaf Mold | 0.96 | 0.97 | 0.96 |
| Tomato Septoria Leaf Spot | 0.94 | 0.92 | 0.93 |
| Tomato Spider Mites (Two-spotted) | 0.92 | 0.91 | 0.91 |
| Tomato Target Spot | 0.94 | 0.93 | 0.93 |
| Tomato Mosaic Virus | 0.90 | 0.88 | 0.89 |
| Tomato Yellow Leaf Curl Virus | 0.91 | 0.89 | 0.90 |
| Tomato Healthy | 0.98 | 0.97 | 0.97 |
| Average | 0.94 | 0.93 | 0.94 |

To evaluate potential class imbalance effects, the dataset distribution was analysed, revealing minor variations among classes (ranging from 900 to 1100 samples per disease). Although balanced overall, slight disparities were addressed through stratified 5-fold cross-validation to ensure equal representation of each disease class during training. Furthermore, detailed per-class Precision, Recall, and F1-scores are provided in Table 5. The results indicate that classes such as Tomato Mosaic Virus and Tomato Yellow Leaf Curl Virus show slightly lower recall due to their similar visual symptoms, while Early Blight and Leaf Mold achieved the highest scores, confirming the model's robustness across categories.

This study presents a hybrid model for deeper learning for the handicraft spectral-texture features and tomato leaf disease classification. Using random One Classifier, EXG, ExR, HSV, GLCM, Tamura, and FFT features, received 89.2% accuracy, showing the value of domain-specific features. Exposing the strength of transfer learning, a fine skilled NetTB0 model improved performance up to 94%. To ensure transparency, the size explained the importance of convenience, and enhances the imagined disease-packed image areas of grade-CAM, model interpretation. This dual approach supports more reliable, clear and practical disease diagnosis than the model dependent on CNN. While the results are promising, the performance may vary under different field conditions. Future work will focus on data growth, mobile scale and optimization of real -world environment. Overall, the model provides a strong foundation for accurate agriculture through efficient and explanatory plant disease detection.

CONCLUSION

This study presents an interpretable framework for tomato leaf disease diagnosis using a hybrid approach. Handcrafted features such as ExG, VEG, GLCM contrast, and Tamura coarseness enabled a Random Forest classifier to achieve 93% accuracy,

demonstrating the discriminative power of spectral and texture features. A fine-tuned EfficientNetB0 deep model further improved classification performance to 94%. Explainability tools like SHAP and Grad-CAM enhanced interpretability by highlighting disease-relevant regions and verifying that the model's attention aligns with biologically meaningful symptoms. PCA visualizations confirmed clear class separability, validating the robustness of feature extraction and model learning. When both models were combined via soft-voting ensemble, the overall accuracy improved to 96%, effectively balancing predictive precision and interpretability.

While the proposed ensemble CNN-RF-SHAP framework demonstrates strong classification accuracy under controlled conditions, real-world field scenarios pose additional challenges such as variable illumination, complex backgrounds, and partial occlusions. Disease stages also vary in texture and color intensity, which may affect recognition accuracy. To address these, future work will incorporate image normalization, shadow removal, and adaptive thresholding to enhance robustness. Additionally, model compression and pruning will be explored to reduce computational overhead for edge deployment on mobile or drone-based systems.

The developed hybrid and explainable framework thus support practical agricultural use, enabling transparent and high-performance disease diagnostics. Future work will extend this model with real-time image capture, hyperspectral imaging, and deployment through edge computing devices or mobile applications to support precision agriculture and smart farming environments.

REFERENCES

1. Choi H.-G., Park K.-S. Ripening Process of Tomato Fruits Postharvest: Impact of Environmental Conditions on Quality and Chlorophyll a Fluorescence Characteristics. *Horticulturae*. 2023;9:812. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9070812>
2. Leszczuk A., Kutryeva-Nowak N., Nowak A., Nosalewicz A., Zdunek A. Low Oxygen Environment Effect on the Tomato Cell Wall Composition During the Fruit Ripening Process. *BMC Plant Biology*. 2024;24(503). <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05226-x>
3. Kulkarni P., Shastri Dr. S. Rice Leaf Diseases Detection Using Machine Learning. *Journal of Scientific Research and Technology*. 2024;2(1):17–22. <https://doi.org/10.61808/jsrt81>
4. Ramesh S., Hebbar R., Niveditha M., Pooja R., Prasad B.N., Shashank N., et al. Plant Disease Detection Using Machine Learning. In: International Conference on Design Innovations for 3Cs Compute Communicate Control. Bangalore. 2018. P. 41. <https://doi.org/10.1109/ICDI3C.2018.00017>
5. Adekunle T.S., Lawrence M.O., Alabi O.O., Afolorunso A.A., Ebong G.N., Oladipupo M.A. Deep Learning Technique for Plant Disease Detection. *Computer Science and Information Technologies*. 2024;5(1):55–62. <https://doi.org/10.11591/csit.v5i1.pp55-62>
6. Khalid M.M., Karan O. Deep Learning for Plant Disease Detection: Deep Learning for Plant. *International Journal of Mathematics Statistics and Computer Science*. 2023;(2):75–84. <https://doi.org/10.59543/ijmscs.v2i.8343>
7. Jung M., Song J.S., Shin A.-Y., Choi B., Go S., Kwon S.-Y., et al. Construction of Deep Learning-Based Disease Detection Model in Plants. *Scientific Reports*. 2023;13(7331). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-34549-2>
8. Jafar A., Bibi N., Naqvi R.A., Sadeghi-Niaraki A., Jeong D. Revolutionizing Agriculture with Artificial Intelligence: Plant Disease Detection Methods, Applications, and their Limitations. *Frontiers in Plant Science*. 2024;(15). <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1356260>

9. Chin P.-W., Ng K.-W., Palanichamy N. Plant Disease Detection and Classification Using Deep Learning Methods a Comparison Study. *Journal of Informatics and Web Engineering*. 2024;3(1). <https://doi.org/10.33093/jiwe.2024.3.1.10>
10. Shao W., Rajapaksha P., Wei Y., Li D., Crespi N., Luo Z. COVAD: Content-Oriented Video Anomaly Detection Using a Self Attention-Based Deep Learning Model. *Virtual Reality & Intelligent Hardware*. 2023;5(1):24–41. <https://doi.org/10.1016/j.vrih.2022.06.001>
11. Zhang M., Tian X. Transformer Architecture Based on Mutual Attention for Image-Anomaly Detection. *Virtual Reality & Intelligent Hardware*. 2023;5(1): 57–67. <https://doi.org/10.1016/j.vrih.2022.07.006>
12. Dai L., Wu L., Li H., Cai C., Wu Q., Kong H., et al. A Deep Learning System for Detecting Diabetic Retinopathy Across the Disease Spectrum. *Nature Communications*. 2021;12(3242). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23458-5>
13. Maitra D.S., Bhattacharya U., Parui S.K. CNN Based Common Approach to Hand Written Character Recognition of Multiple Scripts. In: 13th International Conference on Document Analysis and Recognition. Tunis. 2015. pp. 1021–1025. <https://doi.org/10.1109/ICDAR.2015.7333916>
14. Shah N., Jain S. Detection of Disease in Cotton Leaf Using Artificial Neural Network. In: Amity International Conference on Artificial Intelligence. Dubai. 2019. pp. 473–476. <https://doi.org/10.1109/AICAI.2019.8701311>
15. Barbedo J.G.A. Factors Influencing the Use of Deep Learning for Plant Disease Recognition. *Biosystems Engineering*. 2018;172:84–91. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.05.013>
16. Bin L., Zhang Y., He D., Li Y. Identification of Apple Leaf Diseases Based on Deep Convolutional Neural Networks. *Symmetry*. 2017;10(1):11. <https://doi.org/10.3390/sym10010011>
17. Kuricheti G., Supriya P. Computer Vision Based Turmeric Leaf Disease Detection and Classification: a Stepto Smart Agriculture. In: 3rd International Conference on Trends in Electronics and Informatics. Tirunelveli. 2019. pp. 545–549. <https://doi.org/10.1109/ICOEI.2019.8862706>
18. Demilie W.B. Plant Disease Detection and Classification Techniques: a Comparative Study of the Performances. *Journal of Big Data*. 2024;11(5). Available at: <https://link.springer.com/article/10.1186/s40537-023-00863-9> (accesses 15.04.2025).
19. Ngugi H.N., Ezugwu A.E., Akinyelu A.A., Abualigah L. Revolutionizing Crop Disease Detection with Computational Deep Learning: a Comprehensive Review. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2024;196(302). <https://doi.org/10.1007/s10661-024-12454-z>
20. Barbedo J.G.A. A Review on the Main Challenges in Automatic Plant Disease Identification Based on Visible Range Images. *Biosystems engineering*. 2016;(144):52–60. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.01.017>
21. Bharate A.A., Shirdhonkar M.S. A Review on Plant Disease Detection Using Image Processing. In: International Conference on Intelligent Sustainable Systems. Palladam. 2017. pp. 103–109. <https://doi.org/10.1109/ISS1.2017.8389326>
22. Reddy J.N., Vinod K., As R.A. Analysis of Classification Algorithms for Plant Leaf Disease Detection. In: International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies. Coimbatore. 2019. pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICECCT.2019.8869090>
23. Rumpf T., Mahlein A.-K., Steiner U., Oerke E.-C., Dehne H.-W., Plümer L. Early Detection and Classification of Plant Diseases with Support Vector Machines Based on Hyperspectral Reflectance. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2010;74(1):91–99. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2010.06.009>
24. Ji M., Liu P., Wu Q. Feasibility of Hybrid PSO-ANN Model for Identifying Soybean Diseases. *International Journal of Cognitive Informatics and Natural Intelligence*. 2021;5(4):1–16.
25. Chohan M., Khan A., Chohan R., Katpar S.H., Mahar M.S. Plant Disease Detection using Deep Learning. *International Journal of Recent Technology and Engineering*. 2020;9(1):909–914. <https://doi.org/10.35940/ijrte.A2139.059120>

26. Arya S., Singh R. A Comparative Study of CNN and AlexNet for Detection of Disease in Potato and Mango leaf. In: International Conference on Issues and Challenges in Intelligent Computing Techniques. Ghaziabad. 2019. pp. 27–28 <https://doi.org/10.1109/ICICT46931.2019.8977648>
27. Jayanthi V., Kanchana M. Predictive Tomato Leaf Disease Detection and Classification: A Hybrid Deep Learning Framework. In: Proceedings of International Conference on Communication and Computational Technologies. Singapore. 2024. P. 11. https://doi.org/10.1007/978-981-97-7423-4_2
28. Abden S., Bendjima M., Benkrama S. Tomato Leaf Disease Detection and Classification Using Deep Learning. In: IoT-Enabled Energy Efficiency Assessment of Renewable Energy Systems and Microgrids in Smart Cities. Cham. 2024. P. 363. https://doi.org/10.1007/978-3-031-60632-8_31
29. Wang X., Liu J. An Efficient Deep Learning Model for Tomato Disease Detection. *Plant Methods*. 2024;20(61). <https://doi.org/10.1186/s13007-024-01188-1>
30. Sun H., Fan C., Gai X., Al-Absi M.A., Wang S., Alam M., et al. Multi-Kernel Inception Aggregation Diffusion Network For Tomato Disease Detection. *BMC Plant Biology*. 2024;24(1069). <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05797-9>
31. Batool A., Hyder S.B., Rahim A., Waheed N., Asghar M.A., Fawad. Classification and Identification of Tomato Leaf Disease Using Deep Neural Network. In: International Conference on Engineering and Emerging Technologies. Lahore. 2020. pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICEET48479.2020.9048207>
32. Tm P., Pranathi A., SaiAshritha K., Chittaragi N.B., Koolagudi S.G. Tomato Leaf Disease Detection Using Convolutional Neural Networks. In: Eleventh International Conference on Contemporary Computing. Noida. 2018. pp. 1–5 <https://doi.org/10.1109/IC3.2018.8530532>
33. Zhang X., Vinatzer B.A., Li S. Hyperspectral Imaging Analysis for Early Detection of Tomato Bacterial Leaf Spot Disease. *Scientific Reports*. 2024;14(27666). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-78650-6>
34. Mensink T., Uijlings J.R.R., Kuznetsova A., Gygli M., Ferrari V. Factors of Influence for Transfer Learning Across Diverse Appearance Domains and Task Types. *Preprint*. 2021. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2103.13318>
35. Mustafa B., Loh A., Freyberg J., MacWilliams P., Karthikesalingam A., Houlsby N., et al. Supervised Transfer Learning at Scale for Medical Imaging. *Preprint*. 2021. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2101.05913>
36. Nguyen C., Hassner T., Seeger M., Archambeau C. Leep: A New Measure to Evaluate Transferability of Learned Representations. In: International Conference on Machine Learning. 2020. pp 7294–7305. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2002.12462>
37. Argueso D., Picon A., Irusta U., Medela A., San-Emeterio M.G., Bereciartua A., et al. Few-Shot Learning Approach for Plant Disease Classification Using Images Taken in the Field. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2020;175. Article no. 105542. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105542>
38. Sun J., Cao W., Fu X., Ochi S., Yamanaka T. Few-Shot Learning for Plant Disease Recognition: a Review. *Agronomy Journal*. 2023;116(3):1204–1216. <https://doi.org/10.1002/agj2.21285>
39. Supian M.B.A., Madzin H., Albahari E. Plant Disease Detection and Classification Using Image Processing Techniques: a Review. In: 2nd International Conference on Applied Engineering. Batam. 2019. pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICAE47758.2019.9221712>

About the authors:

Pratik Buchke, Research Scholar, VIT Bhopal University (Kotrikalan, Sehore, Madhya Pradesh, India), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7575-5083>

Arul Vinayakam Rajasimman Mayuri, Senior Assistant Professor, VIT Bhopal University (Kotrikalan, Sehore, Madhya Pradesh, India), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4010-4600>

Authors contribution:

P. Buchke – development or design of methodology; creation of models, software, verification, whether as a part of the activity or separate, of the overall replication / reproducibility of results / experiments and other research outputs, application of statistical, mathematical, computational, or other formal techniques to analyse or synthesize study data, investigation, resources, data curation, writing original draft preparation, writing review and editing.

A.V.R. Mayuri – 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, application of statistical, mathematical, computational, or other formal techniques to analyse or synthesize study data, conducting a research and investigation process, specifically performing the experiments, or data/evidence collection, data curation, writing review and editing.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 22.07.2025; revised 03.10.2025; accepted 09.10.2025

Об авторах:

Бухке Прадик, научный сотрудник, Открытый Университет Бхопал (Котрикалан, Сехор, Мадхья-Прадеш, Индия), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7575-5083>

Маюри Арул Винаякам Раджасимман, старший преподаватель, Открытый Университет Бхопал (Котрикалан, Сехор, Мадхья-Прадеш, Индия), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4010-4600>

Вклад авторов:

П. Бухке – разработка или проектирование методологии исследования; создание моделей, разработка программного обеспечения, проверка воспроизводимости результатов экспериментов и исследования в рамках основных или дополнительных задач работы, применение статистических, математических, вычислительных или других формальных методов для анализа или синтеза данных исследования, проведение исследования, предоставление ресурсов, курирование данных, написание черновика рукописи, написание рукописи – рецензирование и редактирование.

А.В.Р. Маюри – разработка или проектирование методологии исследования; создание моделей, проверка воспроизводимости результатов экспериментов и исследования в рамках основных или дополнительных задач работы, применение статистических, математических, вычислительных или других формальных методов для анализа или синтеза данных исследования, проведение исследования, осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов или сбор данных / доказательств, курирование данных, написание рукописи – рецензирование и редактирование.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 22.07.2025; поступила после рецензирования 03.10.2025;
принята к публикации 09.10.2025*

**ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ /
TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT**<https://doi.org/10.15507/2658-4123.036.202601.114-139>EDN: <https://elibrary.ru/uxmgof>

УДК / UDK 004.932.2:631.17:581.2:633.11

*Оригинальная статья / Original article***Разработка маломощной onboard-системы
точечной детекции фитопатологий пшеницы
с применением модифицированной
YOLO-архитектуры****С. Г. Мударисов, И. Р. Мифтахов** ✉,
И. М. Фархутдинов, Э. И. Шафеева*Башкирский государственный аграрный университет,
г. Уфа, Российская Федерация, <https://ror.org/02ybewg31>*✉ info323@bk.ru*Аннотация*

Введение. Ранняя диагностика фитопатологий зерновых культур является одной из ключевых задач точного земледелия, поскольку позднее выявление заболеваний приводит к существенным потерям урожайности и неэффективному применению средств защиты растений. Существующие системы фитосанитарного мониторинга в основном ориентированы на постобработку данных и требуют значительных вычислительных ресурсов, что ограничивает их применение на борту беспилотных летательных аппаратов. В этой связи актуальной научной задачей является обеспечение высокоточной диагностики заболеваний растений в реальном времени в условиях жестких вычислительных и энергетических ограничений бортовых платформ.

Цель исследования. Разработка энергоэффективной onboard-системы детекции болезней пшеницы, способной к работе в реальном времени на встраиваемых платформах.

Материалы и методы. Объект исследования – посеvy пшеницы в условиях открытого грунта. В качестве аппаратной основы использовались вычислительные модули Jetson TX2, NavQ Plus и Raspberry Pi 4. Для построения модели применена модифицированная архитектура YOLO с интеграцией малозатратных сверточных блоков (GhostConv, MBCov), модулей внимания (SE, CBAM) и расширенной структуры агрегации признаков ViFPN. Обучение выполнено на размеченной выборке из 7 500 изображений симптомов бурой и желтой ржавчины.

Результаты исследования. Разработанная модель обеспечила высокие показатели качества детекции F1-мера до 0,978, средний IoU – 0,82. Производительность достигала 16,8 FPS на Jetson TX2 и 13,6 FPS на NavQ Plus при энергоэффективности до 2,7 FPS/Вт.

Обсуждение и заключение. Сравнительный анализ показал превосходство модели над базовой YOLOv5s по всем ключевым метрикам. Предложенная архитектура демонстрирует высокую точность, устойчивость к шумам и применимость в условиях реального времени. Она может быть использована для создания интеллектуальных систем фитосанитарного мониторинга и автоматизированного управления средствами защиты растений на базе беспилотных летательных аппаратов.

© Мударисов С. Г., Мифтахов И. Р., Фархутдинов И. М., Шафеева Э. И., 2026

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

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, фитопатология, глубокое обучение, детекция заболеваний растений, YOLO, встраиваемые платформы, onboard-обработка данных, точное земледелие, нейросетевые архитектуры, агромониторинг

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

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: 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>

Development of a Low-Power Onboard System for Point Detection of Wheat Diseases Using a Modified YOLO Architecture

S. G. Mudarisov, I. R. Miftakhov ,

I. M. Farkhutdinov, E. I. Shafeeva

Bashkir State Agrarian University,

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

 info323@bk.ru

Abstract

Introduction. Early diagnosis of diseases of cereal crops is a key task for precision agriculture, because late disease detection results in significant yield losses and inefficient use of plant protection products. Existing phytosanitary control systems mainly focus on offline data post-processing and require substantial computational resources that limits their use on board unmanned aerial vehicles (UAV). In this context, a relevant scientific challenge is to ensure highly accurate real-time plant disease diagnosis under strict computational and energy constraints of onboard platforms.

Aim of the Study. The study is aimed at developing an energy-efficient onboard wheat disease detection system capable of real-time operation on embedded platforms.

Materials and Methods. The object of the study was wheat crops under open-field conditions. The system was tested on the computer modules Jetson TX2, NavQ Plus and Raspberry Pi 4. To build the system, there was used a modified YOLO-based architecture integrating lightweight convolutional blocks (GhostConv, MBConv), attention modules (SE, CBAM), and an extended BiFPN feature aggregation structure. Training was based on a dataset of 7,500 annotated images of brown and yellow rust symptoms.

Results. The developed model demonstrated high detection quality scores: F1-score up to 0.978 and average IoU of 0.82. Performance achieved 16.8 FPS on Jetson TX2 and 13.6 FPS on NavQ Plus, with energy efficiency up to 2.7 FPS/W.

Discussion and Conclusion. The comparative analysis showed that the proposed model outperformed the baseline YOLOv5s according to all key metrics. The proposed architecture demonstrates high accuracy, robustness to noise, and real-time applicability. It can be used to create intelligent crop health control systems and automated plant protection control based on UAV platforms.

Keywords: unmanned aerial vehicle, phytopathology, deep learning, plant disease detection, YOLO, embedded platforms, onboard data processing, precision agriculture, neural network architectures, crop control

Funding: The materials presented in the article were obtained as part of the implementation of the Bashkir State University strategic academic leadership program «Priority 2030».

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

For citation: Mudarisov S.G., Miftakhov I.R., Farkhutdinov I.M., Shafeeva E.I. Development of a Low-Power Onboard System for Point Detection of Wheat Diseases Using a Modified YOLO Architecture. *Engineering Technologies and Systems*. 2026;36(1):114–139. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.036.202601.114-139>

ВВЕДЕНИЕ

Современное сельское хозяйство, особенно в условиях интенсификации производства и перехода к технологиям точного земледелия, остро нуждается в эффективных системах мониторинга фитосанитарного состояния посевов. Одним из наиболее значимых факторов, негативно влияющих на урожайность зерновых культур, остается фитопатологические заболевания, включая бурую и желтую ржавчину, ежегодно вызывающие потери до 20–30 % от общего объема продукции. Раннее выявление признаков заболеваний позволяет своевременно провести защитные мероприятия и существенно снизить экономический ущерб, однако реализация такого мониторинга традиционными методами (визуальный осмотр, выборочные лабораторные пробы) сопряжена с высокой трудоемкостью, субъективностью и невозможностью охвата больших территорий.

С развитием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и технологий искусственного интеллекта появились новые подходы к автоматизированному мониторингу сельскохозяйственных угодий. Однако, несмотря на прогресс в области компьютерного зрения и глубинного обучения, большинство существующих решений не адаптированы к эксплуатации в условиях реального времени на борту БПЛА и требуют высокопроизводительных вычислительных серверов. Проблема ограниченных вычислительных и энергетических ресурсов остается одной из ключевых при разработке бортовых систем диагностики, особенно при необходимости детектировать мелкомасштабные симптомы заболеваний в естественных условиях съемки.

Существующие исследования в области детекции фитопатологий преимущественно фокусируются на классификационных задачах, не предполагающих локализацию патологических участков. Более того, предлагаемые архитектуры нейросетей часто избыточны по числу параметров и требуют значительных ресурсов для обучения и инференса. В связи с этим возникает необходимость разработки специализированной энергоэффективной нейросетевой архитектуры, способной к точечному обнаружению заболеваний растений в реальном времени на встроенных устройствах.

Актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью создания интеллектуальных onboard-систем диагностики фитопатологий, пригодных для развертывания на легких БПЛА, оснащенных недорогими вычислительными модулями (Jetson TX2, NavQ Plus, Raspberry Pi 4 и др.). Это позволит внедрять автоматизированный мониторинг здоровья растений непосредственно в процесс

агропроизводства, обеспечивая точечное внесение средств защиты растений и снижение общих затрат.

Главной идеей настоящей работы является разработка и экспериментальная проверка модифицированной архитектуры YOLO, оптимизированной для энергоограниченных платформ и дополненной механизмами повышения чувствительности к мелким признакам заболеваний. Предложенная система ориентирована на комплексную оценку точности классификации, скорости обработки и энергоэффективности, что позволит расширить рамки существующих решений.

Целью исследования является создание onboard-системы точечной детекции фитопатологий пшеницы на основе модифицированной YOLO-архитектуры, обеспечивающей высокую точность, производительность и энергоэффективность при работе в реальных полевых условиях на встраиваемых платформах.

Для достижения поставленной цели необходимо проанализировать современные подходы к детекции фитопатологий сельскохозяйственных культур с использованием методов глубокого обучения и бортовых вычислительных систем БПЛА, выявив их ограничения в условиях ограниченных вычислительных и энергетических ресурсов. Разработать модифицированную архитектуру нейросетевого детектора на основе семейства YOLO, ориентированную на повышение энергоэффективности и чувствительности к мелкомасштабным признакам фитопатологий при сохранении возможности работы в реальном времени на встраиваемых платформах. Сформировать и аннотировать датасет изображений посевов пшеницы с признаками бурой и желтой ржавчины, полученных в полевых условиях с использованием беспилотного летательного аппарата. Реализовать и обучить предложенную модель с применением облегченных сверточных блоков и механизмов внимания, а также оптимизированных методов агрегации признаков. Провести экспериментальную оценку качества детекции и локализации фитопатологий с использованием стандартных метрик (Precision, Recall, F1-мера, IoU), а также оценить производительность и энергоэффективность модели на различных встраиваемых вычислительных платформах. Выполнить сравнительный анализ предложенной архитектуры с базовой моделью YOLOv5s, подтвердив статистическую значимость полученных улучшений по точности, скорости обработки и энергоэффективности.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Ежегодно фитопатологические заболевания (например, ржавчина зерновых) снижают урожайность сельскохозяйственных культур на 20–30 %, что обуславливает высокую значимость систем ранней диагностики [1]. В последнее десятилетие доминирующим подходом к автоматической идентификации болезней растений стало применение методов глубокого обучения, превосходящих традиционные алгоритмы обработки изображений по точности и надежности. Современные нейросетевые модели демонстрируют впечатляющие результаты: точность классификации заболеваний по изображениям листьев часто превышает 95 %, а сети для детекции и сегментации поражений достигают более 90 % точности при выделении очагов инфекций [2]. Этот прогресс отражен в серии обзоров литературы, суммирующих новейшие достижения и проблемы цифровой фитодиагностики. В частности,

отмечается возрастающий исследовательский интерес к использованию глубоких нейросетей в аграрном секторе и одновременно подчеркивается необходимость адаптации этих моделей к практическим условиям полевого мониторинга.

Развитие БПЛА открыло новые возможности для мониторинга состояния посевов. Технологии дистанционного зондирования, включая съемку с дронов, признаны ключевым инструментом точного земледелия, позволяют оперативно выявлять проблемы на полях и оптимизировать агротехнические меры. Современные БПЛА, оснащенные камерами высокого разрешения, способны собирать детальные данные о заболеваниях растений с высоким пространственным и временным разрешением [3]. Исследователи по всему миру активно применяют БПЛА для обнаружения наиболее распространенных болезней (поражения пшеницы, сахарной свеклы, картофеля, кукурузы, винограда и др.). Как правило, используются мультиспектральные или RGB-камеры для фиксации симптомов, все чаще в сочетании с методами машинного обучения и глубоких нейронных сетей [3]. В связи с этим сформировался междисциплинарный подход, объединяющий беспилотные платформы и алгоритмы искусственного интеллекта для автоматизированного фитосанитарного мониторинга.

Многие современные исследования ориентированы на применение сверточных нейронных сетей семейства YOLO для детекции признаков заболеваний на аэрофотоснимках сельхозкультур. Например, коллектив ученых из Китая улучшил алгоритм YOLOv5 для распознавания сорного растения *Ambrosia Trifida* на UAV-изображениях, предложив модификацию YOLOv5-KE [4]. Достигнутая ими точность детекции (AP порядка 93,9 %) подтверждает эффективность глубокого обучения для решения подобных задач. Однако данная модель не была адаптирована под ограниченные вычислительные ресурсы бортовых систем и требовала производительного оборудования, что снизило ее пригодность для автономной работы на дроне. Другой пример, подход MCD-YOLOv5, разработанный L. Li, H. Zhao и N. Liu для идентификации болезней и вредителей с воздуха [5]. В эту модель были интегрированы механизмы внимания (CBAM) и даже трансформерные слои, что позволило достичь высокой точности классификации (~88 % в многокультурном наборе данных). Тем не менее, сложная архитектура существенно увеличила требовательность модели к вычислительным ресурсам, затруднив ее развертывание на маломощных платформах.

Параллельно ведутся работы над упрощенными нейросетевыми моделями, ориентированными на классификацию заболеваний растений по изображениям. Исследователи из Синьцзянского университета предложили легкую архитектуру MS-Net, которая достигла 99,8 % точности на популярном датасете PlantVillage и ~97,8 % на реальных изображениях пораженных яблоневых листьев [6]. Высокая результативность MS-Net демонстрирует потенциал компактных CNN в задачах распознавания, однако важно отметить, что эта модель решает лишь задачу классификации (определения болезни на отдельных фото) и не выполняет детекцию объектов, т. е. не локализует пораженные области на больших снимках посевов. Более того, алгоритм не был протестирован в условиях реального времени, оставаясь, по сути, офлайн-методом лабораторной диагностики.

Аналогичные ограничения присущи и другим легковесным моделям. Так, индийские ученые представили сеть RTR_Lite_MobileNetV2 для быстрого распознавания болезней растений [7]. Она успешно работает в режиме реального времени и способна различать заболевания по изображениям, однако не предусматривает модуль выявления и отслеживания конкретных очагов инфекции на масштабных кадрах.

Интересный подход предложили Y. Zhong, Z. Teng и M. Tong. Их модель LightMixer представляет собой сверхкомпактную сверточную сеть (число параметров <1,5 млн) и добивается более 99 % точности при классификации листьев томата на наличие болезни [8]. Достижение такой высокой точности при небольшом размере модели подтверждает возможность оптимизации глубокой сети без значимой потери качества. Однако применение LightMixer ограничено задачами статической классификации: в ней отсутствует механизм детекции объектов, и она не адаптирована для работы на борту БПЛА в полевых условиях [9].

Многие из существующих решений либо ориентированы на высокоточную классификацию отдельных изображений, либо требуют ресурсоемких моделей для детекции, что затрудняет их использование в сценариях реального времени на больших территориях.

Практическая реализация беспилотных систем мониторинга диктует необходимость обработки данных непосредственно на устройстве (на самом дроне или связанном с ним вычислительном модуле) без постоянной передачи в облако. Концепция Edge Computing, предполагающая локальную обработку прямо у источника данных, приобретает все большее значение в агротехнологиях [10]. Вынос вычислений «на край» (например, на бортовой компьютер дрона) позволяет существенно снизить задержки и зависимость от каналов связи, обеспечивая оперативное обнаружение болезней и немедленную реакцию (например, точечное внесение пестицидов) [2]. Однако перенос сложных моделей глубокого обучения на маломощные устройства сталкивается с серьезными трудностями.

Во-первых, полевые условия накладывают ограничения на качество входных данных. В естественной среде пораженные участки могут слабо контрастировать с фоном, размеры пятен варьируются, а на изображениях присутствуют шумы и неравномерное освещение [2]. Эти факторы затрудняют выявление болезней традиционными методами машинного зрения, требующими ручного выделения признаков.

Во-вторых, глубокие нейросети более устойчивы к подобным вариациям, но сами по себе часто громоздки. Полнофункциональные модели показывают высокую точность ценой большого числа параметров и вычислительных операций, что делает их несовместимыми с ограниченными ресурсами мобильных и встро-енных устройств. Для работы в реальном времени на борту дрона модель должна быть максимально оптимизирована и облегчена. В литературе подчеркивается, что снижение сложности сети (числа параметров, FLOPs) является критически важным для внедрения искусственного интеллекта в сельхозтехнику [2].

Исследователи из Саудовской Аравии и Пакистана продемонстрировали высокую эффективность применения моделей семейства YOLO для диагностики

заболеваний растений на основе изображений листьев. Модели YOLOv3 и YOLOv4, обученные на открытом наборе данных PlantVillage, обеспечивают точность классификации до 97–98 % при высоких показателях скорости и устойчивости к вариабельности симптомов [11]. Полученные результаты подтверждают перспективность использования архитектур YOLO для задач оперативной и потенциально мобильной диагностики фитопатологий, однако подчеркивают необходимость оптимизации вычислительной сложности моделей для внедрения в ресурсоограниченные платформы.

В ответ на этот вызов разрабатываются специальные облегченные версии детекторов. Например, предложена модификация YOLO под названием GVC-YOLO для детекции поврежденных вредителем листьев хлопчатника на Edge-устройстве. Модель основана на компактной версии YOLOv8n с использованием облегченных сверточных блоков (GSCnv) и упрощенной Neck-архитектуры VoV-GSCSP, что позволяет снизить сложность сети без критичного падения качества. В результате размер полученной модели составил всего ~5,4 МБ (на 17 % меньше базового YOLOv8n), а число параметров и операций уменьшилось примерно на 16–17 %. При этом точность детекции осталась высокой (суммарная mAP_{0,5:0,95} порядка 90,3 %), а скорость обработки достигла ~48 кадров/с на компактном устройстве Jetson Xavier NX [12].

Этот и ряд схожих трудов подтверждают, что комбинация специальных модулей сверток, механизма внимания и оптимизированной архитектуры позволяет достичь баланса между точностью и быстродействием модели на маломощном аппаратном обеспечении.

Несмотря на заметный прогресс, в рассматриваемой области остаются нерешенные вопросы и пробелы.

Во-первых, отмечается недостаток комплексных исследований, оценивающих в совокупности точность алгоритма и показатели его производительности. Многие авторы концентрируются лишь на метриках классификации (Precision, Recall и др.), не анализируя скорость работы модели и ее энергоэффективность на целевой платформе. Между тем для агропромышленных приложений критично именно сочетание высоких показателей распознавания с ограниченным потреблением ресурсов.

Во-вторых, текущие решения, как правило, решают либо задачу локализации пораженных участков, либо задачу определения типа болезни, но не оба аспекта одновременно. Отдельные легкие модели классифицируют заболевание, не умея выделять его на изображении (MS-Net, LightMixер и др.), тогда как облегченные детекторы (вариации YOLO) не предлагают встроенной идентификации конкретного типа патогена. Создание мультитасковой архитектуры, способной одновременно обнаруживать очаги фитопатологий и классифицировать их вид, остается перспективным направлением будущих исследований [13].

В-третьих, даже самые новые и точные алгоритмы компьютерного зрения зачастую непригодны для полевого применения без доработки. К примеру, семейство моделей YOLOv8 демонстрирует рост точности mAP на ~3 % по сравнению с YOLOv5, однако прямое использование YOLOv8 на встроенных

платформах затруднено из-за возросших требований к памяти и вычислительной мощности.

Таким образом, перед научным сообществом стоит задача разработки методов, сочетающих высокую точность и робастность обнаружения заболеваний с обеспечением ресурсоэффективности, позволяющей выполнять анализ непосредственно на борту БПЛА в режиме реального времени. Решение данной задачи позволит создать интеллектуальные системы агромониторинга нового поколения, способные существенно повысить оперативность и адресность мер борьбы с болезнями растений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования

Объектом исследования являются посевы пшеницы мягкой яровой (*Triticum Aestivum* L.), возделываемые в условиях открытого грунта, а также процессы формирования и визуального проявления фитопатологических поражений листового аппарата, обусловленных развитием бурой (*Puccinia Triticina*) и желтой (*Puccinia Striiformis*) ржавчины [14].

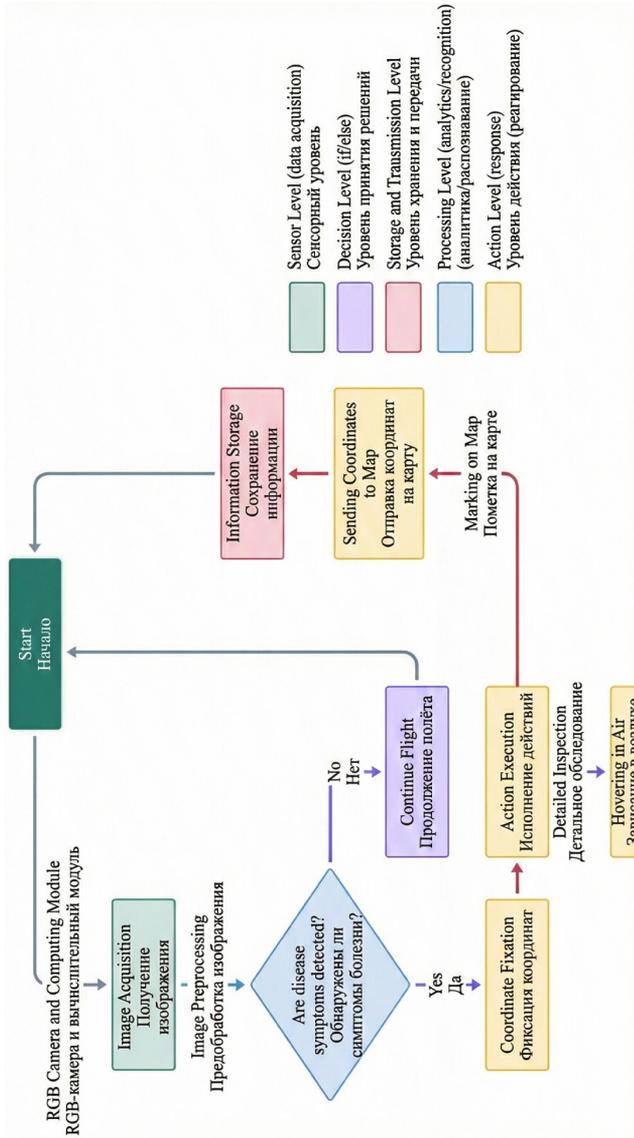
В рамках работы объект исследования рассматривается с точки зрения возможности автоматизированной точечной детекции и локализации очагов заболеваний по RGB-изображениям, полученным с БПЛА, с последующей обработкой данных непосредственно на борту при использовании энергоограниченных встраиваемых вычислительных платформ.

Материалы и оборудование

Для обеспечения достоверности и воспроизводимости эксперимента была использована следующая материально-техническая база:

- БПЛА DJI Phantom 4 Pro с RGB-камерой 20 МП, фокусное расстояние 8,8 мм;
- вычислительные модули Jetson TX2, NavQ Plus и Raspberry Pi 4;
- измерительные приборы: USB-амперметр (точность 0,01 А) для оценки энергопотребления Raspberry Pi 4 и утилита jtop для мониторинга телеметрических данных Jetson TX2;
- программное обеспечение для обучения и инференса моделей – PyTorch 2.1, CUDA 11.8, Python 3.10.

Общий принцип функционирования onboard-системы диагностики и последовательность обработки данных представлены на структурно-функциональной схеме (рис. 1). Разработанная система представляет собой бортовую интеллектуальную вычислительную платформу, интегрированную в состав БПЛА, и ориентирована на решение задачи автономного фитосанитарного мониторинга сельскохозяйственных культур в реальном времени. Система реализована по модульной архитектуре и включает подсистему сбора данных (RGB-камера), вычислительную подсистему предварительной обработки и нейросетевого анализа изображений, логическую подсистему принятия решений, а также исполнительную подсистему, обеспечивающую управление полетом, пространственную привязку результатов и передачу диагностических данных.



Р и с. 1. Структурно-функциональная схема работы системы onboard-диагностики фитопатологий на борту БПЛА

Fig. 1. Structural and functional diagram of the onboard disease diagnostic system on board a UAV

Источники: рисунки 1, 2 составлены авторами статьи в программе «Microsoft Visio».
Source: figures 1, 2 are compiled by the authors using Microsoft Visio.

Методы исследования

Для решения поставленных задач применялся комплекс экспериментальных и вычислительных методов, включающий:

- методы глубокого обучения и компьютерного зрения для решения задачи объектной детекции фитопатологических поражений растений;
- методы архитектурной оптимизации сверточных нейронных сетей, ориентированные на снижение вычислительной сложности и энергопотребления при сохранении высокой точности детекции;
- методы оценки качества распознавания, основанные на расчете метрик Precision, Recall, F1-score и Intersection over Union (IoU);
- методы оценки вычислительной производительности, включающие измерение скорости обработки (FPS) и энергоэффективности (FPS/Вт);
- методы математической статистики для анализа устойчивости результатов и проверки статистической значимости различий между базовой и модифицированной моделями.

Указанные методы были реализованы в виде экспериментальной onboard-системы и апробированы в ходе поэтапного эксперимента, включающего сбор данных, их предварительную обработку, нейросетевой анализ и оценку качества детекции.

Процедура исследования

В рамках экспериментального исследования была реализована onboard-система фитопатологической диагностики, включающая RGB-камеру высокого разрешения и вычислительный модуль обработки изображений.

RGB-камера осуществляла захват визуальных данных посевов, которые по интерфейсу CSI-2 передавались на вычислительный модуль и подвергались предварительной обработке, включающей шумоподавление, цветокоррекцию и нормализацию входных изображений.

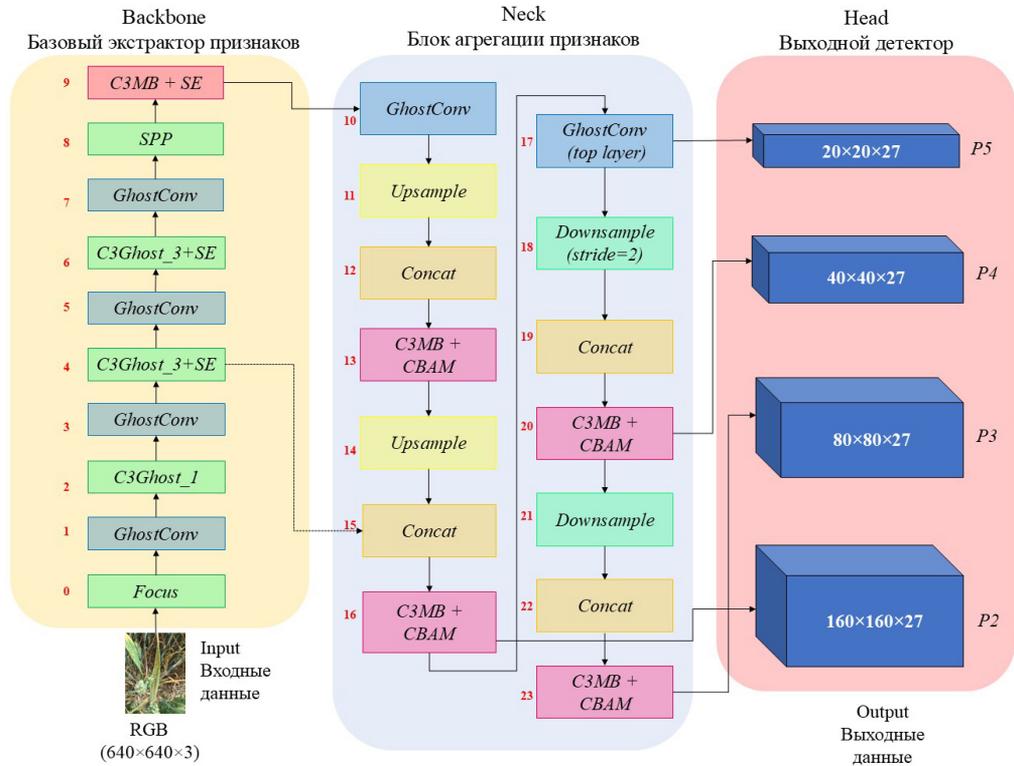
На следующем этапе предварительно обработанные данные анализировались моделью глубокого обучения на основе сверточных нейронных сетей с использованием подхода Object Detection. Архитектура модели была построена на облегченной версии семейства YOLO, оптимизированной для встраиваемых вычислительных платформ за счет применения компактных сверточных блоков GhostConv, C3Ghost, а также блока C3MB с глубинными свертками MBConv (рис. 2) [15].

Для повышения чувствительности к мелкомасштабным признакам фитопатологических поражений в структуру Backbone были интегрированы модули внимания SE и CBAM, обеспечивающие акцентирование признаков, связанных с патологическими изменениями листового аппарата растений.

Для экспериментальной проверки разработанной архитектуры была сформирована схема сравнительного анализа, ориентированная на оценку точности, вычислительной производительности и энергоэффективности модели в полевых условиях.

Для количественной и качественной оценки эффективности разработанного решения была сформирована экспериментальная схема сопоставления двух архитектур нейросетевой детекции – базовой и модифицированной. Анализ проводился для выявления влияния архитектурных преобразований на способность моделей

обеспечивать устойчивую пространственную локализацию фитопатологических поражений в условиях ограниченных вычислительных ресурсов и наличия внешних искажений входных данных.



Р и с. 2. Архитектура модифицированной модели для точечной детекции заболеваний растений на основе облегченного YOLO-детектора
 Fig. 2. Architecture of the modified model for spot detection of plant diseases based on a lightweight YOLO detector

В качестве исходной архитектурной основы использовалась модель YOLOv5s, выбранная по совокупности показателей вычислительной сложности и качества распознавания. Данная конфигурация характеризуется значением метрики mAP@0,5 порядка 0,90 при сравнительно небольшом числе параметров (около 7 млн) и вычислительной нагрузке на уровне ~17 GFLOPs, что позволяет реализовать высокопроизводительный инференс без предъявления повышенных требований к аппаратной платформе. Указанные свойства обосновывают использование YOLOv5s в качестве базовой модели для дальнейшей адаптации к условиям энергоограниченных встраиваемых систем.

Предложенная модифицированная архитектура ориентирована на снижение вычислительных затрат за счет уменьшения пространственного разрешения входных данных до 416×416 пикселей при сохранении диагностической информативности.

С целью оптимизации вычислительного графа стандартные сверточные операции были заменены облегченными архитектурными блоками GhostConv и C3Ghost, дополненными механизмами канального внимания SE, что позволило сократить избыточные вычисления без деградации качества извлекаемых признаков. Для повышения избирательности сети к локальным патологическим изменениям дополнительно интегрированы модули пространственно-канального внимания CBAM.

В части многомасштабной обработки признаков традиционная схема агрегации PANet была заменена расширенным вариантом BiFPN, обеспечивающим более эффективное объединение признаков различных уровней абстракции. Архитектура детекторной части дополнена дополнительным уровнем P2, предназначенным для выявления мелкогабаритных объектов, характерных для ранних стадий фитопатологических поражений. Кроме того, в структуру модели внедрены глубинные сверточные блоки MBCov, отсутствующие в базовой конфигурации, что позволило повысить эффективность извлечения признаков при одновременном снижении вычислительной сложности сети [16].

На первом этапе выполнялся сбор исходных данных. Аэрофотосъемка посевов пшеницы осуществлялась в полевых условиях в вегетационный период при естественном освещении. Высота полета БПЛА составляла 7–10 м, что обеспечивало достаточное пространственное разрешение для фиксации мелкогабаритных симптомов фитопатологических поражений. Съемка проводилась в разные дни и при различных условиях освещенности с целью повышения вариативности данных.

На следующем этапе формировался и аннотировался датасет изображений. Всего было отобрано 7 500 RGB-изображений, включающих как здоровые растения, так и растения с признаками бурой и желтой ржавчины. Разметка выполнялась вручную с использованием ограничивающих прямоугольников и верифицировалась экспертами-агрономами. Для повышения обобщающей способности модели применялись методы аугментации данных, увеличившие объем обучающей выборки. Данные были разделены на обучающую, валидационную и тестовую выборки в соотношении 70 % / 15 % / 15 % (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

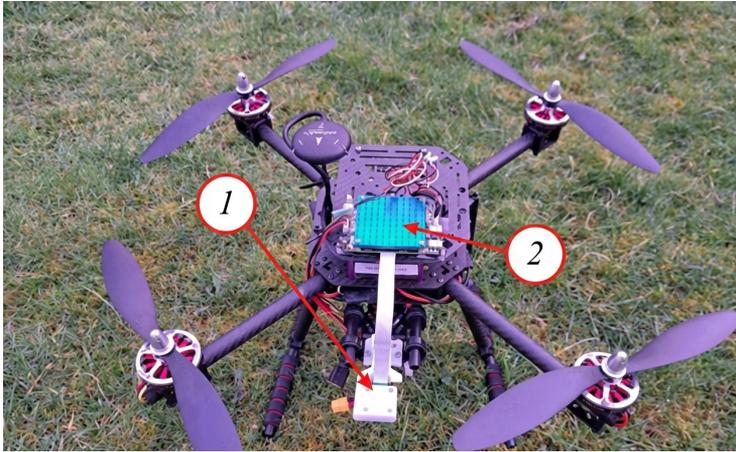
T a b l e 1

Соотношения количество собранных данных для обучения
Distribution of the collected dataset for model training

| Класс заболеваний / Disease class | Количество фото / Number of images | | тренировочные / train | валидационные / val | тестовые / test |
|---|---------------------------------------|-------|--------------------------|------------------------|--------------------|
| | шт. / piece | % | | | |
| Бурая ржавчина / Brown rust | 3 970 | 52,93 | 2779 | 596 | 595 |
| Желтая ржавчина / Yellow rust | 3 530 | 47,07 | 2471 | 530 | 529 |
| Процентное соотношения / Percentage distribution | 7 500 | 100 | 70 % | 15 % | 15 % |

Тестовая выборка включала изображения с других полей и разных дней съемки для оценки обобщающей способности модели. Далее выполнялась

экспериментальная проверка обученных моделей на встраиваемых вычислительных платформах Jetson TX2, NavQ Plus и Raspberry Pi 4, установленных на борту БПЛА (рис. 3). Их характеристики приведены в таблице 2. Для каждой платформы измерялись показатели точности детекции, скорость инференса и энергопотребление в режиме работы. Значения FPS и энергопотребления усреднялись по 100 итерациям обработки.



Р и с. 3. Место установки бортовых вычислительных модулей:
 1 – камера Google Coral; 2 – бортовой компьютер NXP NavQ Plus, Jetson TX2, Raspberry Pi 4
 F i g. 3. Installation location of onboard computing modules on the unmanned aerial vehicle:
 1 – Google Coral RGB camera; 2 – onboard computing module
 (NXP NavQ Plus / NVIDIA Jetson TX2 / Raspberry Pi 4)

Источник: фотографии для рисунков 3, 6 сделаны авторами в ходе натурных экспериментов летом 2024 года.

Source: the photographs for figures 3,6 are taken by the authors during field experiments in summer 2024.

Т а б л и ц а 2

Table 2

Сравнение вычислительных модулей
 Comparison of computing modules used in the onboard system

| Платформа / Platform | ЦПУ / CPU | Акселератор / Accelerator | ОЗУ / RAM | Энергопотребление / Power consumption |
|----------------------|---------------------------------------|----------------------------------|-------------|--|
| NVIDIA Jetson TX2 | 2×Denver2 + 4×ARM A57 @ 2 ГГц / 2 GHz | GPU 256-ядер Pascal (1,3 TFLOPS) | 8 ГБ / 8 GB | 7,5–15 Вт (типич. =10 Вт) / 7.5–15 W (typical ~10 W) |
| NXP NavQ Plus | 4×Cortex-A53 @ 1,8 ГГц / 1.8 GHz | NPU 2,3 TOPS | 4 ГБ / 4 GB | = 5 Вт / 5 W |
| Raspberry Pi 4 | 4×Cortex-A72 @ 1,5 ГГц / 1.5 GHz | – | 4 ГБ / 4 GB | = 6 Вт / 6 W |

Jetson TX2 превосходит другие платформы по вычислительной мощности благодаря встроенному GPU. NavQ Plus и Raspberry Pi 4 близки по CPU-ресурсам, но NavQ имеет преимущество за счет нейронного ускорителя.

Для оценки качества использовались стандартные метрики Recall, Precision, F1-мера и IoU [4; 11]. Также измерялись среднее время обработки и скорость (FPS), с усреднением по 100 итерациям. Энергопотребление оценивалось в режимах простоя и инференса по формуле [17]:

$$P = U \cdot I,$$

где P – потребляемая электрическая мощность, Вт; U – напряжение питания, В; I – сила электрического тока, А.

Для Jetson TX2 дополнительно применялась утилита jtop, позволяющая получать телеметрические данные о текущем энергопрофиле. Для Raspberry Pi использовался внешний USB-амперметр с разрешением 0,01 А.

Для количественной оценки и проверки достоверности результатов использовались методы описательной и параметрической статистики. Для каждой исследуемой метрики (Precision, Recall, F1, IoU, FPS, FPS/Вт) рассчитывались средние значения, стандартное отклонение и 95 %-й доверительный интервал по 100 итерациям инференса.

Для сравнения результатов базовой модели YOLOv5s и модифицированной архитектуры применялся t-критерий Стьюдента (уровень значимости $p < 0,05$), что позволило подтвердить статистическую значимость улучшений.

Для обоснования конкурентоспособности предложенной модели была проведена сравнительная оценка существующих подходов. При сравнении учитывались тип решаемой задачи, показатели точности, вычислительная производительность, пригодность для работы в реальном времени и возможность развертывания на энергоограниченных встраиваемых платформах.

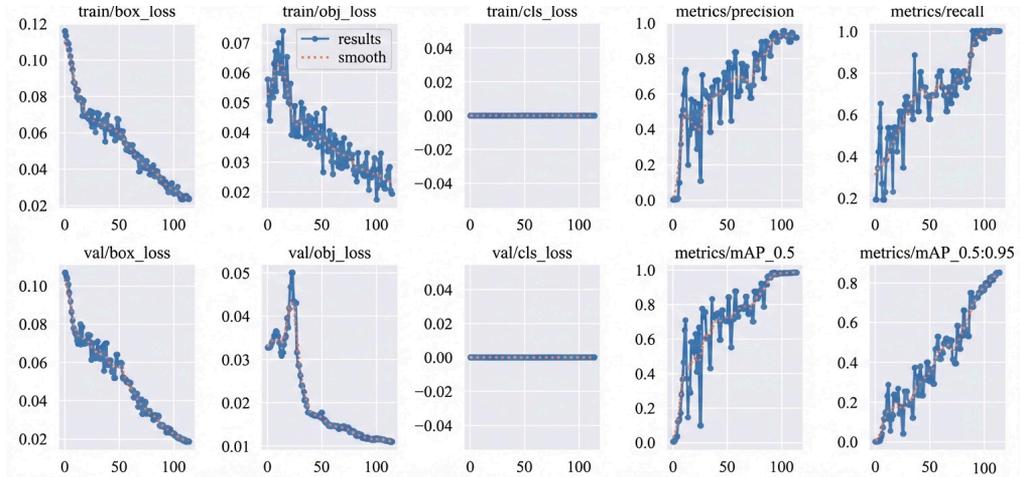
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В рамках сравнительного анализа рассматривались две конфигурации нейросетевого детектора: базовая модель YOLOv5s [5] и предложенная модифицированная архитектура, разработанная с целью повышения точности распознавания и энергоэффективности при работе на вычислительно ограниченных встраиваемых платформах. Процессы обучения и последующей валидации моделей проанализированы на основе динамики функций потерь и основных метрик качества, представленных на рисунках 4 и 5.

Анализ динамики обучения показал стабильную сходимость обеих моделей, характеризующуюся последовательным снижением значений `box_loss` и `obj_loss`. Для модифицированной архитектуры наблюдалась более выраженная скорость сходимости и меньшая вариативность значений потерь, что указывает на улучшенную способность к обобщению. Показатель `cls_loss` в обоих случаях был равен нулю вследствие бинарной постановки задачи. Итоговые значения `mAP@0,5` и `mAP@0,5:0,95` для модифицированной модели составили 0,98 и 0,83 соответственно, тогда как для YOLOv5s – 0,90 и 0,75.

Анализ кривых обучения, представленных на рисунках 4 и 5, показывает, что применение облегченных вычислительных блоков GhostConv и MBConv обеспечило более высокую скорость сходимости и устойчивость процесса оптимизации. Для модифицированной архитектуры характерна ранняя стабилизация значений

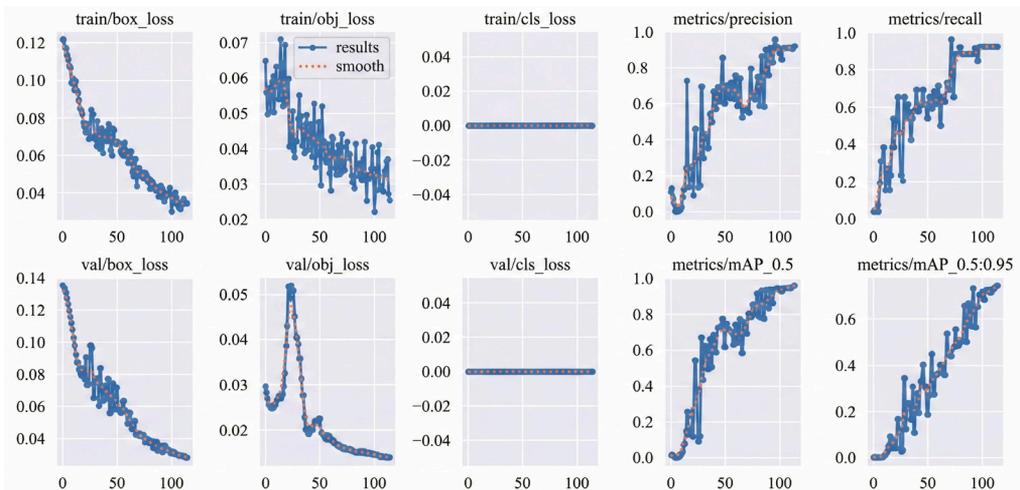
функций `obj_loss` и `box_loss`, что свидетельствует о снижении чувствительности модели к шумам входных данных и повышении устойчивости обучения. Интеграция механизмов внимания SE и СВМ способствовала уменьшению эффекта переобучения, что выражается в сокращении разрыва между значениями ошибок на обучающей и валидационной выборках.



Р и с. 4. Визуализация оценки производительности модели YOLOv5s во время обучения
 F i g. 4. Visualization of YOLOv5s model performance during training

Источник: графики для рисунков 4, 5 автоматически сгенерированы авторами в ходе обучения модели в локальной вычислительной среде с использованием фреймворка Ultralytics YOLOv5 (Python, PyTorch).

Source: figures 4, 5 graphs were automatically generated by the authors during model training using the framework Ultralytics YOLOv5 (Python, PyTorch).

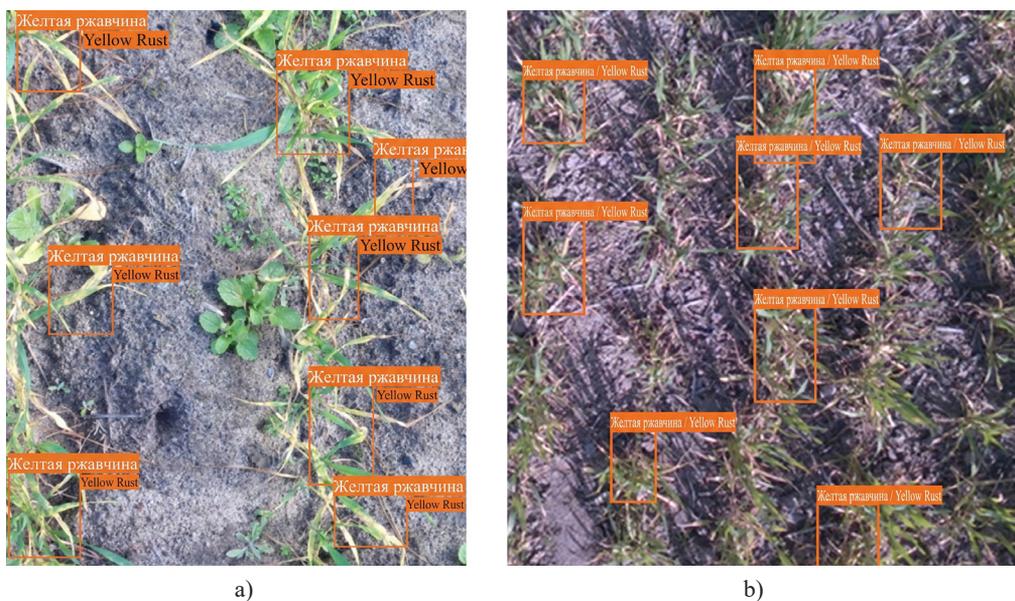


Р и с. 5. Визуализация оценки производительности модели модифицированной модели во время обучения
 F i g. 5. Visualization of the modified model performance during training

Использование расширенного модуля агрегации признаков BiFPN совместно с дополнительным выходным уровнем P2 позволило повысить эффективность обнаружения мелкомасштабных объектов. Данный эффект проявился в увеличении значения метрики Recall при одновременном сохранении стабильных значений Precision, что указывает на улучшенный баланс между полнотой и точностью детекции [18; 19].

Для количественной оценки различий между базовой и модифицированной архитектурами был выполнен статистический анализ показателей Precision, Recall и F1. Полученные результаты показали снижение числа ложных срабатываний (FP) и пропусков (FN) в диапазоне от 18 до 24 % в зависимости от используемой вычислительной платформы. Выявленные различия являются статистически значимыми ($p < 0,05$), что подтверждает устойчивость предложенной архитектуры к аппаратным ограничениям и ее повышенную чувствительность к мелкомасштабным признакам фитопатологических поражений.

Экспериментальная проверка работоспособности системы проводилась как на офлайн-тестовой выборке, так и в условиях реальных полетов БПЛА. Тестовый набор включал 1 124 изображения, полученных при высоте съемки 5–10 м в различных условиях освещенности (рис. 6), с равномерным распределением образцов между классами бурой и желтой ржавчины.



Р и с. 6. Фотографии детектирования:

a) на высоте 5 м; b) на высоте 10 м

F i g. 6. Examples of disease detection in wheat crops:

a) imaging at an altitude of 5 m; b) imaging at an altitude of 10 m

Для оценки качества работы системы были рассчитаны метрики (Precision, Recall, F1, IoU) по бурой и желтой ржавчине для базовой и модифицированной моделей (табл. 3, 4) [20].

Таблица 3

Table 3

Оценка точности и локализации модели YOLOv5s на встраиваемых платформах
Evaluating the accuracy and localization of the model YOLOv5s on embedded platforms

| Платформа / Platform | Точность / Accuracy (%) | Точность (бур.) / Accuracy (brown rust) | Полнота (бур.) / Recall (brown rust) | F1-мера (бур.) / F1-score (brown rust) | Точность (желт.) / Accuracy (yellow rust) | Полнота (желт.) / Recall (yellow rust) | F1-мера (желт.) / F1-score (yellow rust) | IoU (среднее) / IoU (mean) |
|----------------------|-------------------------|---|--------------------------------------|--|---|--|--|----------------------------|
| Jetson TX2 | 95,30 | 0,925 | 0,935 | 0,930 | 0,937 | 0,927 | 0,932 | 0,765 |
| NavQ Plus | 91,65 | 0,902 | 0,890 | 0,896 | 0,881 | 0,902 | 0,891 | 0,715 |
| Raspberry Pi 4 | 79,50 | 0,803 | 0,765 | 0,784 | 0,776 | 0,822 | 0,798 | 0,685 |

Таблица 4

Table 4

Оценка точности и локализации модифицированной модели на встраиваемых платформах
Evaluating the accuracy and localization of the modified model on embedded platform

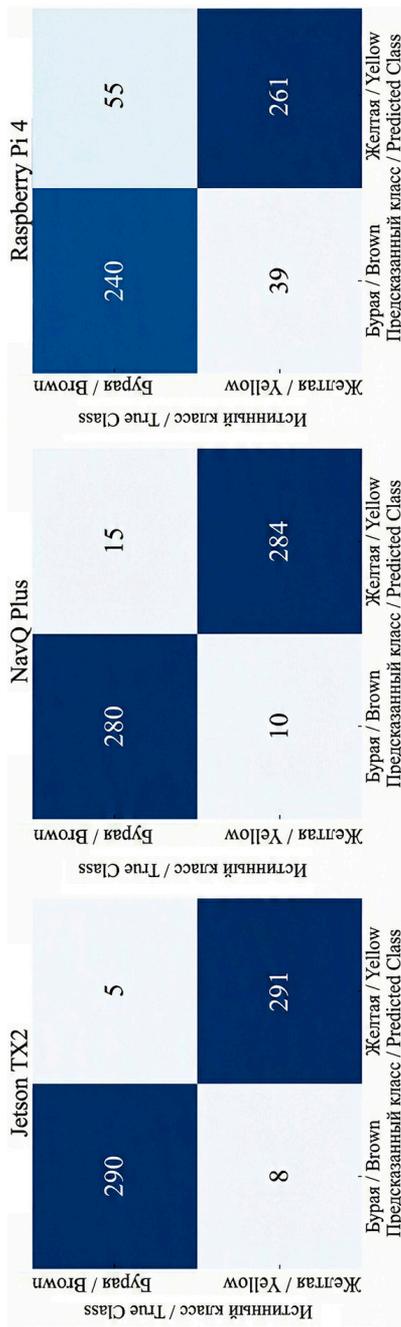
| Платформа / Platform | Точность / Accuracy (%) | Точность (бур.) / Accuracy (brown rust) | Полнота (бур.) / Recall (brown rust) | F1-мера (бур.) / F1-score (brown rust) | Точность (желт.) / Accuracy (yellow rust) | Полнота (желт.) / Recall (yellow rust) | F1-мера (желт.) / F1-score (yellow rust) | IoU (среднее) / IoU (mean) |
|----------------------|-------------------------|---|--------------------------------------|--|---|--|--|----------------------------|
| Jetson TX2 | 97,81 | 0,973 | 0,983 | 0,978 | 0,983 | 0,973 | 0,978 | 0,820 |
| NavQ Plus | 95,25 | 0,966 | 0,949 | 0,957 | 0,950 | 0,966 | 0,958 | 0,790 |
| Raspberry Pi 4 | 84,87 | 0,860 | 0,813 | 0,836 | 0,826 | 0,870 | 0,847 | 0,740 |

Результаты экспериментальной оценки показали, что модифицированная архитектура обеспечивает устойчивый рост показателей точности и полноты распознавания для обоих классов заболеваний на всех исследуемых вычислительных платформах. Наиболее выраженный эффект зафиксирован при работе на платформе Raspberry Pi 4: для класса бурой ржавчины значение Precision увеличилось с 0,803 до 0,860, а Recall – с 0,765 до 0,813, что указывает на снижение ложных срабатываний и пропусков объектов.

Улучшение интегральной метрики F1 также носит систематический характер. Так, при детекции желтой ржавчины значение F1 на платформе Jetson TX2 возросло с 0,932 до 0,978, а на NavQ Plus – с 0,891 до 0,958, что свидетельствует о более сбалансированном соотношении между точностью и полнотой распознавания в условиях ограниченных вычислительных ресурсов.

Дополнительным подтверждением повышения качества пространственной локализации объектов является рост среднего значения метрики IoU. Для платформы Jetson TX2 данный показатель увеличился с 0,765 до 0,820, для NavQ Plus – с 0,715 до 0,790, а для Raspberry Pi 4 – с 0,685 до 0,740. Наблюдаемая динамика подтверждает эффективность предложенных архитектурных решений, направленных на улучшение детекции мелкомасштабных фитопатологических признаков.

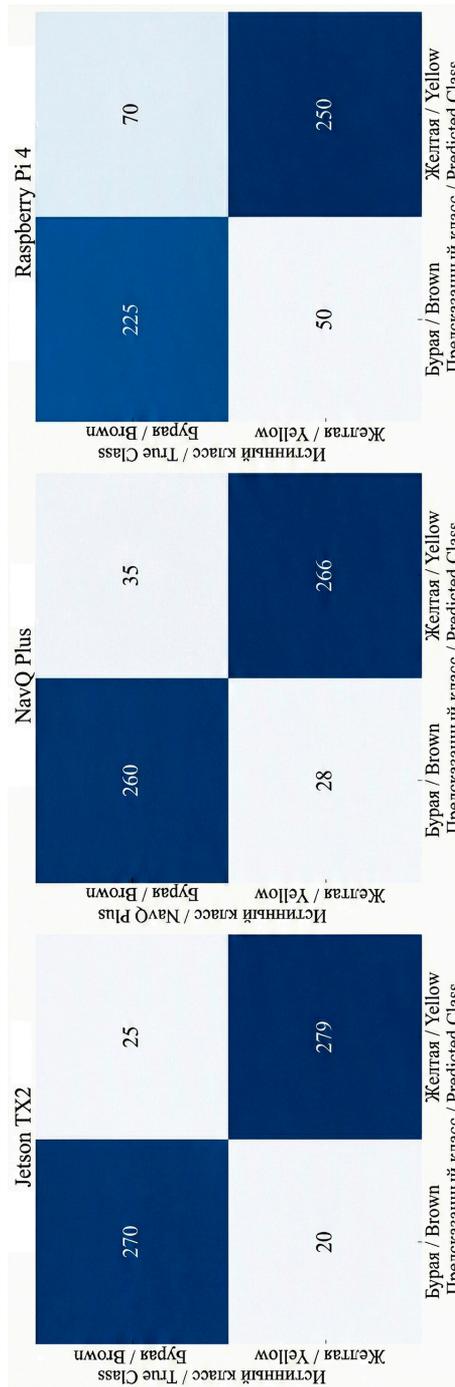
Сравнительный анализ матриц ошибок, представленных на рисунках 7 и 8, выполненный для трех вычислительных платформ, позволил выявить общие закономерности поведения моделей и платформо-зависимые особенности их работы в различных вычислительных средах.



Р и с. 7. Матрицы ошибок классификации заболеваний пшеницы (бурой и желтой ржавчины) на исследуемых платформах в модифицированной модели

Fig. 7. Error matrices of wheat disease classification (brown and yellow rust) on the investigated embedded platforms for the modified model

Источники: рисунки 7, 8 автоматически сформированы авторами статьи по результатам экспериментальных исследований.
 Source: figures 7, 8 were automatically generated by the authors based on the experimental results.



Р и с. 8. Матрицы ошибок классификации заболеваний пшеницы (бурой и желтой ржавчины) на исследуемых платформах в базовой модели YOLOv5s

Fig. 8. Error matrices of wheat disease classification (brown and yellow rust) on the investigated embedded platforms for the baseline YOLOv5s model

Анализ матриц ошибок продемонстрировал, что предложенная модифицированная архитектура обеспечивает существенное сокращение межклассовых ошибок, выражающихся в ложных срабатываниях (FP) и пропусках (FN), на всех исследуемых вычислительных платформах. На платформе Jetson TX2 суммарное количество ошибок снизилось с 45 (25 FP и 20 FN) до 13 (5 FP и 8 FN). Аналогичная тенденция зафиксирована для NavQ Plus, где общее число ошибок уменьшилось с 63 до 26, а также для Raspberry Pi 4, на которой показатель снизился со 120 до 94.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что реализованные архитектурные модификации способствуют повышению устойчивости нейросетевой модели к ограничениям аппаратных ресурсов и обеспечивают улучшенные обобщающие свойства при эксплуатации в различных вычислительных средах [21].

Сводные показатели производительности, энергопотребления и энергоэффективности исследуемых моделей приведены в таблице 5.

Т а б л и ц а 5

T a b l e 5

Показатели производительности и энергоэффективности базовой модели YOLOv5s на различных встраиваемых платформах

Performance and energy efficiency indicators of the baseline model YOLOv5s on various embedded platforms

| Модель/Платформа / Model/Platform | FPS (кадров/с) / FPS (frames per second) | Энергопотребление, Вт / Power consumption, W | FPS/Вт / FPS/W |
|--|---|---|-------------------|
| YOLOv5s/TX2 | 14,3 | 12 | 1,2 |
| Модиф. YOLO/TX2 / Modified YOLO/TX2 | 16,8 | 12 | 1,4 |
| YOLOv5s/NavQ | 10,5 | 5 | 2,1 |
| Модиф. YOLO/NavQ / Modified YOLO/NavQ | 13,6 | 5 | 2,7 |
| YOLOv5s/RPi 4 | 5,0 | 4 | 0,5 |
| Модиф. YOLO/RPi 4 / Modified YOLO/RPi 4 | 6,8 | 4 | 1,7 |

Сопоставление с базовой архитектурой YOLOv5s показало, что предложенная модифицированная модель обеспечивает увеличение частоты обработки кадров в диапазоне 17–36 % без роста энергопотребления. На платформе NavQ Plus значение FPS возросло с 10,5 до 13,6 FPS, при этом показатель энергоэффективности увеличился с 2,1 до 2,7 FPS/Вт, что свидетельствует о более рациональном использовании вычислительных и энергетических ресурсов.

Аналогичная тенденция зафиксирована и для платформы Raspberry Pi 4, где производительность повысилась с 5,0 до 6,8 FPS, а энергоэффективность – с 0,5 до 1,7 FPS/Вт. Данный прирост соответствует примерно трехкратному увеличению энергоэффективности, что подтверждает целесообразность архитектурной оптимизации модели для эксплуатации на маломощных вычислительных платформах.

Полученные значения F1, IoU, FPS и FPS/Вт демонстрируют взаимосвязанное улучшение точности и энергоэффективности предложенной архитектуры. Наблюдаемый рост F1 сопровождается пропорциональным увеличением FPS/Вт,

что подтверждает достижение поставленной цели – оптимизации детектора под условия ограниченных вычислительных ресурсов без потери точности.

Достигнутые улучшения обусловлены комплексной архитектурной оптимизацией, включающей использование облегченных сверточных блоков GhostConv, S3Ghost и MBConv, интеграцию механизмов внимания SE и CBAM, а также применение расширенной схемы агрегации признаков ViFPN с дополнительным выходным уровнем P2. Совокупность указанных решений позволила повысить энергоэффективность и устойчивость работы модели, а также улучшить точность классификации и локализации объектов при одновременном снижении общего числа параметров сети.

Результаты сравнительной оценки предложенной модели и существующих подходов представлены в таблице 6. Анализ показывает, что разработанная архитектура обеспечивает более высокие показатели точности и локализации при существенно меньших вычислительных и энергетических затратах, что делает ее пригодной для применения на энергоограниченных встраиваемых платформах в задачах оперативной фитопатологической диагностики.

Таблица 6

Table 6

**Сравнительная характеристика существующих моделей детекции
и классификации болезней растений**
**Comparative characteristics of existing models for plant disease
detection and classification**

| Модель / Model | Тип задачи / Task type | Показатели качества / Performance indicators | Реальное время / Real-time | Встраиваемые платформы / Embedded platforms | Источник / Reference |
|--------------------------------------|--------------------------------|---|----------------------------|---|----------------------|
| MS-Net | Классификация / Classification | Высокая точность ~99,8 % / High accuracy ~99.8% | Нет / No | Нет / No | [6] |
| RTR_Lite MobileNetV2 | Классификация / Classification | Точность до 97 % / Accuracy up to 97% | Да / Yes | Нет / No | [7] |
| YOLOv5-KE | Детекция / Detection | AP ~93,9 % / AP ~93.9% | Нет / No | Нет / No | [4] |
| MCD-YOLOv5 | Детекция / Detection | F1 ~88 % / F1 ~88% | Нет / No | Нет / No | [5] |
| LightMixer | Классификация / Classification | До 99 % при малом размере / Up to 99% with compact size | Да / Yes | Нет / No | [8] |
| GVC-YOLO | Детекция / Detection | mAP@0,5:0,95 ~90,3 % / mAP@0,5:0,95 ~90.3% | Да / Yes | Да / Yes | [12] |
| Предлагаемая модель / Proposed model | Детекция / Detection | F1 до 0,978; IoU до 0,82 / F1 up to 0.978; IoU up to 0.82 | Да / Yes | Да / Yes | – |

Большинство известных моделей, особенно высокоточных классификаторов (MS-Net, LightMixer), не поддерживают локализацию очагов поражения.

Другие, такие как YOLOv5-KE и MCD-YOLOv5, хотя и решают задачи детекции, не приспособлены к исполнению на маломощных устройствах. Модель GVC-YOLO демонстрирует сбалансированность, однако уступает предложенному решению по F1 и энергоэффективности.

Предложенная архитектура сочетает точность, энергоэффективность и применимость в реальном времени, что позволяет рассматривать ее как научно обоснованную и технологически реализуемую основу для создания интеллектуальных систем агромониторинга.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сопоставление количественных результатов с исходными целями исследования показывает, что повышение точности детекции напрямую коррелирует с ростом энергоэффективности и устойчивости инференса на встраиваемых вычислительных устройствах, что подтверждает эффективность предложенных архитектурных решений при реализации onboard-систем реального времени. Впервые для задач onboard-диагностики заболеваний растений в настоящей работе реализована комплексная интеграция облегченных сверточных блоков GhostConv и MBConv, а также модулей внимания SE и CBAM, что позволило существенно повысить чувствительность модели к мелкомасштабным признакам фитопатологий при одновременном снижении вычислительной и энергетической нагрузки.

Предложенная архитектура нейросетевого детектора на основе модифицированной версии YOLO демонстрирует высокий потенциал применения в задачах точечной детекции фитопатологий на встраиваемых платформах. Разработанная система продемонстрировала F1-меру = 0,978, средний IoU = 0,82, производительность до 16,8 FPS на Jetson TX2 и 13,6 FPS на NavQ Plus при энергоэффективности до 2,7 FPS/Вт – сопоставимы или превосходят аналогичные показатели современных решений, представленных в научной литературе. Эти значения подтверждены статистически ($p < 0,05$) и свидетельствуют о существенном повышении эффективности по сравнению с базовой моделью YOLOv5s.

Практическая реализация разработанной системы открывает возможность внедрения алгоритмов точечной детекции заболеваний растений непосредственно на борту БПЛА [22]. Это обеспечивает автономную диагностику фитопатологий без необходимости передачи данных на удаленные серверы, а также создает предпосылки для интеграции с системами прецизионного внесения средств защиты растений. Полученные результаты имеют как научную, так и прикладную ценность для развития технологий точного земледелия.

В дальнейшем предполагается развитие архитектуры в направлении мультитасковой модели, способной одновременно классифицировать тип болезни, локализовать очаги поражения и прогнозировать динамику их распространения. Отдельный интерес представляет интеграция трансформерных блоков и мультиспектральных сенсоров, что позволит повысить устойчивость модели к шуму и улучшить интерпретируемость результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Savary S., Willocquet L., Pethybridge S.J., Esker P., McRoberts N., Nelson A. The Global Burden of Pathogens and Pests on Major Food Crops. *Nature Ecology & Evolution*. 2019;(3):430–439. <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0793-y>
2. Shoaib M., Sadeghi-Niaraki A., Ali F., Hussain I., Khalid S. Leveraging Deep Learning for Plant Disease and Pest Detection: A Comprehensive Review and Future Directions. *Frontiers in Plant Science*. 2025;(16). Article no. 1538163. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1538163>
3. Kouadio L., Jarroudi M.E., Belabess Z., Laasli S.-E., Roni M.Z.K., Amine I.D.I. и др. A Review on UAV-Based Applications for Plant Disease Detection and Monitoring. *Remote Sensing*. 2023;15(17):4273. <https://doi.org/10.3390/rs15174273>
4. Chen X., Tianzeng C., Haomin M., Ziqi Z., Dehua W., Jianchao S. и др. An Improved Algorithm Based on YOLOv5 for Detecting Ambrosia Trifida in UAV Images. *Frontiers in Plant Science*. 2024;(15). Article no. 1360419. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1360419>
5. Li L., Zhao H., Liu N. MCD-YOLOv5: Accurate, Real-Time Crop Disease and Pest Identification Approach Using UAVs. *Electronics*. 2023;12(20):4365. <https://doi.org/10.3390/electronics12204365>
6. Quan S., Wang J., Jia Z., Yang M., Xu Q. MS-Net: A Novel Lightweight and Precise Model for Plant Disease Identification. *Frontiers in Plant Science*. 2023;(14). Article no. 1276728. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1276728>
7. Duhan S., Gulia P., Gill N.S., Narwal E. RTR_Lite_MobileNetV2: A Lightweight and Efficient Model for Plant Disease Detection and Classification. *Current Plant Biology*. 2025;(42). Article no. 100459. <https://doi.org/10.1016/j.cpb.2025.100459>
8. Zhong Y., Teng Z., Tong M. LightMixer: A Novel Lightweight Convolutional Neural Network for Tomato Disease Detection. *Frontiers in Plant Science*. Article no. 14:1166296. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1166296>
9. Zhao H., Tang Z., Li Z., Dong Y., Si Y., Lu M. и др. Real-Time Object Detection and Robotic Manipulation for Agriculture Using a Yolo-Based Learning Approach. In: IEEE International Conference on Industrial Technology. Bristol: IEEE; 2024. <https://doi.org/10.1109/ICIT58233.2024.10540740>
10. Jiang W., Song J., Chen Z., Qu S. Mobile-Friendly Under-Sampling Single-Pixel Imaging Based on a Lightweight Hybrid CNN-Vit Architecture. *Optics Express*. 2024;32(27):48672–48682. <https://doi.org/10.1364/OE.546375>
11. Alhwaiti Y., Khan M., Asim M., Siddiqi M.H., Ishaq M., Alruwaili M. Leveraging YOLO Deep Learning Models to Enhance Plant Disease Identification. *Scientific Reports*. 2025. Article no. 7969. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-92143-0>
12. Zhang Z., Yang Y., Xu X., Liu L., Yue J., Ding R. и др. GVC-YOLO: A Lightweight Real-Time Detection Method for Cotton Aphid-Damaged Leaves Based on Edge Computing. *Remote Sensing*. 2024;(16). Article no. 3046. <https://doi.org/10.3390/rs16163046>
13. Harle S., Bhagat A., Dash A.K. Remote Sensing Revolution: Mapping Land Productivity and Vegetation Trends with Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). *Current Applied Materials*. 2024;3(1). Article no. e070224226752. <https://doi.org/10.2174/0126667312288014240129080801>
14. Николаев И.В., Курмашева Н.Г. Применение геоинформационной системы «Сторwise Орега» в оценке вегетации яровой пшеницы в условиях ООО «КФХ Хлебодаровка» Республики Башкортостан. *Российский электронный научный журнал*. 2023;(1):73–82. <https://doi.org/10.31563/2308-9644-2023-47-1-73-82>
15. Wadhwa D., Malik K. Deep Learning Generalized Hybrid Models for Multi-Species Crop Disease Classification with Explainable Insights. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2025;(164). Article no. 113317. <https://doi.org/10.2139/ssrn.5139152>
16. Li G., Wang Y., Zhao Q., Yuan P., Chang B. PMVT: A Lightweight Vision Transformer for Plant Disease Identification on Mobile Devices. *Frontiers in Plant Science*. 2023;(14). Article no. 1256773. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1256773>
17. Ferdi Y. Data Augmentation through Background Removal for Apple Leaf Disease Classification Using the Mobilenetv2 Model. [Preprint] 2024. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.01854>

18. Silva P.E.C., Almeida J. An Edge Computing-Based Solution for Real-Time Leaf Disease Classification Using Thermal Imaging. In: IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters: IEEE; 2024. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2024.3456637>
19. Beyaz A., Gül V. YOLOv4 and Tiny YOLOv4 Based Forage Crop Detection with an Artificial Intelligence Board. *Brazilian Archives of Biology and Technology*. 2023;(66). <https://doi.org/10.1590/1678-4324-2023220803>
20. Elhanashi A.E., Dini P., Saponara S., Qinghe Z. Advancements in TinyML: Applications, limitations, and Impact on IoT Devices. *Electronics*. 2024;13(17):3562. <https://doi.org/10.3390/electronics13173562>
21. Duman B. Mobile Device-Based Detection System of Diseases and Pests in Rose Plants Using Deep Convolutional Neural Networks and Quantization. *Journal of Agricultural Sciences*. 2025;31(2):302–318. <https://doi.org/10.15832/ankutbd.1514972>
22. Zhang J., Yu F., Zhang Q., Wang M., Yu J., Tan Y. Advancements of UAV and Deep Learning Technologies for Weed Management in Farmland. *Agronomy*. 2024;14(3):494. <https://doi.org/10.3390/agronomy14030494>

REFERENCES

1. Savary S., Willocquet L., Pethybridge S.J., Esker P., McRoberts N., Nelson A. The Global Burden of Pathogens and Pests on Major Food Crops. *Nature Ecology & Evolution*. 2019;(3):430–439. <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0793-y>
2. Shoaib M., Sadeghi-Niaraki A., Ali F., Hussain I., Khalid S. Leveraging Deep Learning for Plant Disease and Pest Detection: A Comprehensive Review and Future Directions. *Frontiers in Plant Science*. 2025;(16). Article no. 1538163. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1538163>
3. Kouadio L., Jarroudi M.E., Belabess Z., Laasli S.-E., Roni M.Z.K., Amine I.D.I., at al. A Review on UAV-Based Applications for Plant Disease Detection and Monitoring. *Remote Sensing*. 2023;15(17):4273. <https://doi.org/10.3390/rs15174273>
4. Chen X., Tianzeng C., Haomin M., Ziqi Z., Dehua W., Jianchao S., at al. An Improved Algorithm Based on YOLOv5 for Detecting Ambrosia Trifida in UAV Images. *Frontiers in Plant Science*. 2024;(15). Article no. 1360419. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1360419>
5. Li L., Zhao H., Liu N. MCD-YOLOv5: Accurate, Real-Time Crop Disease and Pest Identification Approach Using UAVs. *Electronics*. 2023;12(20):4365. <https://doi.org/10.3390/electronics12204365>
6. Quan S., Wang J., Jia Z., Yang M., Xu Q. MS-Net: A Novel Lightweight and Precise Model for Plant Disease Identification. *Frontiers in Plant Science*. 2023;(14). Article no. 1276728. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1276728>
7. Duhan S., Gulia P., Gill N.S., Narwal E. RTR_Lite_MobileNetV2: A Lightweight and Efficient Model for Plant Disease Detection and Classification. *Current Plant Biology*. 2025;(42). Article no. 100459. <https://doi.org/10.1016/j.cpb.2025.100459>
8. Zhong Y., Teng Z., Tong M. LightMixer: A Novel Lightweight Convolutional Neural Network for Tomato Disease Detection. *Frontiers in Plant Science*. Article no. 14:1166296. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1166296>
9. Zhao H., Tang Z., Li Z., Dong Y., Si Y., Lu M., at al. Real-Time Object Detection and Robotic Manipulation for Agriculture Using a Yolo-Based Learning Approach. In: IEEE International Conference on Industrial Technology. Bristol: IEEE; 2024. <https://doi.org/10.1109/ICIT58233.2024.10540740>
10. Jiang W., Song J., Chen Z., Qu S. Mobile-Friendly Under-Sampling Single-Pixel Imaging Based on a Lightweight Hybrid CNN-Vit Architecture. *Optics Express*. 2024;32(27):48672–48682. <https://doi.org/10.1364/OE.546375>
11. Alhwaiti Y., Khan M., Asim M., Siddiqi M.H., Ishaq M., Alruwaili M. Leveraging YOLO Deep Learning Models to Enhance Plant Disease Identification. *Scientific Reports*. 2025. Article no. 7969. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-92143-0>

12. Zhang Z., Yang Y., Xu X., Liu L., Yue J., Ding R., et al. GVC-YOLO: A Lightweight Real-Time Detection Method for Cotton Aphid-Damaged Leaves Based on Edge Computing. *Remote Sensing*. 2024;(16). Article no. 3046. <https://doi.org/10.3390/rs16163046>
13. Harle S., Bhagat A., Dash A.K. Remote Sensing Revolution: Mapping Land Productivity and Vegetation Trends with Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). *Current Applied Materials*. 2024;3(1). Article no. e070224226752. <https://doi.org/10.2174/0126667312288014240129080801>
14. Nikolaev I.V., Kurmasheva N.G. Application of the Geoinformation System “Cropwise Operations” in the Assessment of the Vegetation of Spring Wheat in the Conditions of LLC “KfH Khlebodarovka” of the Republic of Bashkortostan. *Russian electronic Scientific Journal*. 2023;(1):73–82. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.31563/2308-9644-2023-47-1-73-82>
15. Wadhwa D., Malik K. Deep Learning Generalized Hybrid Models for Multi-Species Crop Disease Classification with Explainable Insights. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2025;(164). Article no. 113317. <https://doi.org/10.2139/ssrn.5139152>
16. Li G., Wang Y., Zhao Q., Yuan P., Chang B. PMVT: A Lightweight Vision Transformer for Plant Disease Identification on Mobile Devices. *Frontiers in Plant Science*. 2023;(14). Article no. 1256773. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1256773>
17. Ferdi Y. Data Augmentation through Background Removal for Apple Leaf Disease Classification Using the Mobilenetv2 Model. [Preprint] 2024. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.01854>
18. Silva P.E.C., Almeida J. An Edge Computing-Based Solution for Real-Time Leaf Disease Classification Using Thermal Imaging. In: *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters: IEEE*; 2024. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2024.3456637>
19. Beyaz A., Gül V. YOLOv4 and Tiny YOLOv4 Based Forage Crop Detection with an Artificial Intelligence Board. *Brazilian Archives of Biology and Technology*. 2023;(66). <https://doi.org/10.1590/1678-4324-2023220803>
20. Elhanashi A.E., Dini P., Saponara S., Qinghe Z. Advancements in TinyML: Applications, limitations, and Impact on IoT Devices. *Electronics*. 2024;13(17):3562. <https://doi.org/10.3390/electronics13173562>
21. Duman B. Mobile Device-Based Detection System of Diseases and Pests in Rose Plants Using Deep Convolutional Neural Networks and Quantization. *Journal of Agricultural Sciences*. 2025;31(2):302–318. <https://doi.org/10.15832/ankutbd.1514972>
22. Zhang J., Yu F., Zhang Q., Wang M., Yu J., Tan Y. Advancements of UAV and Deep Learning Technologies for Weed Management in Farmland. *Agronomy*. 2024;14(3):494. <https://doi.org/10.3390/agronomy14030494>

Об авторах:

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>, Scopus ID: 57200284613, Researcher ID: G-2217-2018, salavam@gmail.com

Мифтахов Ильнур Ринатович, кандидат технических наук, научный сотрудник 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, Researcher ID: JPY-2370-2023, info323@bk.ru

Фархутдинов Ильдар Мавляирович, доктор технических наук, доцент кафедры мехатронных систем и машин аграрного производства Башкирского государственного аграрного университета (450001, Российская Федерация, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, д. 34), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6443-8584>, Researcher ID: G-2816-2018, ildar1702@mail.ru

Шафеева Элина Ильгизовна, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент Башкирского государственного аграрного университета (450001, Российская Федерация, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, д. 34), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2535-1520>, shafeeva20081@rambler.ru

Вклад авторов:

С. Г. Мударисов – разработка концепции, разработка методологии, научное руководство, административное руководство проектом.

И. Р. Мифтахов – разработка концепции, разработка методологии, разработка программного обеспечения, проведение исследования, курирование данных, формальный анализ, визуализация результатов, написание первоначального варианта рукописи.

И. М. Фархутдинов – формальный анализ, валидация результатов, разработка методологии, рецензирование и редактирование рукописи.

Э. И. Шафеева – проведение исследования, курирование данных, валидация результатов, предоставление ресурсов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила в редакцию 23.07.2025; поступила после рецензирования 07.10.2025; принята к публикации 20.10.2025

About the authors:

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

Ilnur R. Miftakhov, Cand.Sci (Eng.), Researcher, Bashkir State Agrarian University (34 50-letiya Oktyabrya St., Ufa 450001, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3125-3532>, Scopus ID: 57204635364, Researcher ID: JPX-2370-2023, info323@bk.ru

Ildar M. Farkhutdinov, Dr.Sci (Eng.), Associate Professor of the Department of Mechatronic Systems and Machines of Agricultural Production, Bashkir State Agrarian University (34 50-letiya Oktyabrya St., Ufa 450001, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6443-8584>, Researcher ID: G-2816-2018, ildar1702@mail.ru

Elina I. Shafeeva, Cand.Sci (Agr.), Associate Professor, Bashkir State Agrarian University (34 50-letiya Oktyabrya St., Ufa 450001, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2535-1520>, shafeeva20081@rambler.ru

Authors contribution:

S. G. Mudarisov – developing the study concept and methodology, supervising and managing the study.

I. R. Miftakhov – developing the study concept and methodology, developing the software development, conducting the study, collecting data, formal analysis, visualizing the study results visualization, creating the manuscript draft.

I. M. Farkhutdinov – formal analysis, validating the study results, developing the study methodology, editing and reviewing the manuscript.

E. I. Shafeeva – conducting the study, collecting the data, validating the study results, and resource.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 23.07.2025; revised 07.10.2025; accepted 20.10.2025

**ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ /
TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT**<https://doi.org/10.15507/2658-4123.036.202601.140-157>EDN: <https://elibrary.ru/ztdfzv>

УДК / UDK 628.8:001.8

*Оригинальная статья / Original article***Адаптивное управление микроклиматом
в кабине мобильного энергетического
средства на основе прогнозирования методом
экспоненциального сглаживания****А. П. Савельев¹, Н. И. Джабборов², С. А. Петров³✉**¹ *Национальный исследовательский**Мордовский государственный университет,**г. Саранск, Российская Федерация, <https://ror.org/0262qgk29>*² *Институт агроинженерных и экологических проблем**сельскохозяйственного производства –**филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ,**г. Санкт-Петербург, Российская Федерация,**<https://ror.org/05fhdzx69>*³ *Тверская государственная сельскохозяйственная академия,**г. Тверь, Российская Федерация, <https://ror.org/0211wgq19>*✉ petrovmolokovo@yandex.ru*Аннотация*

Введение. Поддержание оптимальных микроклиматических условий в кабине мобильных энергетических средств является важным фактором обеспечения комфорта и продуктивности оператора. Отклонение от нормативных значений, возникающее в результате неравномерности теплопоступлений от ограждающих поверхностей кабины и наружного воздуха, может негативно повлиять на здоровье и работоспособность механизатора. Поэтому необходимо разработать адаптивный алгоритм работы климатической установки, способный прогнозировать изменения теплопоступлений в кабину и заранее корректировать холодопроизводительность.

Цель исследования. Разработка адаптивного алгоритма работы климатической установки кабины мобильных энергетических средств.

Материалы и методы. Для исследования процесса формирования микроклиматических условий в кабине мобильных энергетических средств, в том числе зависимости изменения температуры в кабине трактора, применялся метод теоретического анализа формирования теплового баланса. Применяемый экспериментальный метод включал в себя проведение измерений температуры в кабине трактора Т-150К. Прогнозирование осуществлялось методом экспоненциального сглаживания.

Результаты исследования. Разработан адаптивный алгоритм работы климатической установки в кабине мобильных энергетических средств. Получено уравнение для

© Савельев А. П., Джабборов Н. И., Петров С. А., 2026

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

прогнозирования температуры воздуха и холодопроизводительности климатической установки. Адаптивный алгоритм теоретически обоснован и проверен на практике. **Обсуждение и заключение.** Адаптивный алгоритм позволяет прогнозировать изменение температуры в интервале одной минуты с расхождением теоретических и экспериментальных значений – 2 %. При прогнозировании изменения холодопроизводительности климатической установки расхождение составляет 5 %. Экспериментальная проверка, проведенная на тракторе Т-150К, показала низкую погрешность прогнозирования, что позволяет применять адаптивный алгоритм для работы климатических установок.

Ключевые слова: мобильное энергетическое средство, микроклиматические условия в кабинах МЭС, метод экспоненциального сглаживания, прогнозирование температуры воздуха, прогнозирование холодопроизводительности климатической установки

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Савельев А.П., Джабборов Н.И., Петров С.А. Адаптивное управление микроклиматом в кабине мобильного энергетического средства на основе прогнозирования методом экспоненциального сглаживания. *Инженерные технологии и системы.* 2026;36(1):140–157. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.036.202601.140-157>

Adaptive Control of the Microclimate in the Cabin of a Mobile Energy Vehicle Based on Forecasting by Exponential Smoothing

A. P. Savelyev^a, N. I. Jabborov^b, S. A. Petrov^c✉

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

^b Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM, St. Petersburg, Russian Federation, <https://ror.org/05fhdzx69>

^c Tver State Agricultural Academy, Tver, Russian Federation, <https://ror.org/0211wgq19>

✉ petrovmolokovo@yandex.ru

Abstract

Introduction. Controlling microclimates in the cabin of mobile energy vehicles is an important factor for ensuring operator comfort and productivity. Failure to conform to the microclimate standard values, resulting from uneven heat input from the cab enclosing surfaces and outside can negatively impact the operator health and performance. Therefore, it is necessary to develop an adaptive algorithm of climate control system operation for forecasting the changes in heat input into the cabin and preadjusting cooling capacity. **Aim of the Study.** The study is aimed at developing an adaptive algorithm for the climate control system operation in the cabins of mobile energy vehicles.

Materials and Methods. The theoretical analysis of heat balance formation was used to study the creating process of microclimate conditions in the cabins of mobile energy vehicles, including the dependence of temperature changes in the tractor cabin. There was also used an experimental method involved temperature measurements in the cabin of a T-150K tractor. The exponential smoothing method was used as a forecasting method in the cabins of mobile energy vehicles.

Results. As a result of the study, an adaptive algorithm for climate control system has been developed. There has been found an equation for forecasting the air temperature and cooling capacity of a climate control system. An adaptive algorithm for the operation of a climate control system using the exponential smoothing method has been theoretically substantiated and tested in practice.

Discussion and Conclusion. The developed adaptive algorithm makes it possible to predict temperature changes in the range of one minute, while the discrepancy between theoretical and experimental values is 2%. When forecasting changes in the cooling capacity of the climate control system, the discrepancy between theoretical and experimental values was 5%. The theoretical basis of the algorithm includes a heat balance equation using the exponential smoothing method to forecast cabin air temperature. An experimental test carried out in the T-150K tractor showed a low prediction error that allows the use of an adaptive algorithm for the operation of climate control systems.

Keywords: mobile energy facility, microclimatic conditions in MEV cabins, exponential smoothing method, air temperature forecasting, forecasting the cooling capacity of a climate control system

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

For citation: Savelyev A.P., Jabborov N.I., Petrov S.A. Adaptive Control of the Microclimate in the Cabin of a Mobile Energy Vehicle Based on Forecasting by Exponential Smoothing. *Engineering Technologies and Systems*. 2026;36(1):140–157. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.036.202601.140-157>

ВВЕДЕНИЕ

Микроклиматические условия в кабине мобильных энергетических средств (МЭС) играют ключевую роль в обеспечении комфорта и продуктивности работы оператора. Их оптимальные параметры в кабинах устанавливаются нормативной документацией¹. Несмотря на наличие современных климатических установок, многие МЭС сталкиваются с различными проблемами в обеспечении нормативных микроклиматических условий в кабине, что негативно сказывается на здоровье и работоспособности оператора [1]. Так при температуре выше +24...+25 °С работоспособность начинает снижаться². Повышение температуры с +26 до +29 °С приводит к снижению производительности труда примерно на 13 %³, а при +33 °С снижение может достигать 35 % [2–4]. В то же время поддержание температуры в диапазоне +20...+24 °С может повысить производительность примерно на 7 % [5–7]. Таким образом, поддержание оптимальных микроклиматических условий на рабочих местах необходимо для обеспечения высокой производительности и сохранения здоровья работников. Основным

¹ Об утверждении методики проведения специальной оценки условий труда, классификатора вредных и (или) опасных производственных факторов, формы отчета о проведении специальной оценки условий труда и инструкции по ее заполнению: Приказ Министерства труда и социальной защиты РФ от 21 ноября 2023 №817н [Электронный ресурс]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202311300048> (дата обращения: 22.06.2025); Петров С.А., Никифоров М.В., Петрова А.А. Требования к микроклиматическим условиям труда в кабинах транспортно-технологических машин. В: Инновационные технологии: опыт, проблемы, перспективы развития: сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф. Тверь: Тверская государственная сельскохозяйственная академия; 2024. С. 202–205. <https://elibrary.ru/brtrqs>

² Gagge A.P., Stolwijk J.A.J., Nishi Y. An Effective Temperature Scale Based on a Simple Model of Human Physiological Regulatory Response. *ASHRAE Transact.* 1971;(77):247–262.

³ Fanger P.O. Thermal comfort; Analysis and Application in Environmental Engineering. Copenhagen: Danish Technical Press; 1970. 252 p.

фактором, влияющим на микроклиматические условия в кабине, являются теплопоступления. Теплопоступления в кабину МЭС – это количество теплоты, которое поступает из внешней среды. Они могут быть обусловлены разными факторами: солнечная радиация, теплопередача через прозрачные и непрозрачные ограждающие конструкции, тепловыделения от двигателя, трансмиссии, гидросистемы, электрооборудование, человек⁴. Источники теплопоступлений разнообразны. Тепло поступает в кабину за счет солнечной радиации, которая зависит от ориентации окон по сторонам света, времени суток и географического положения. Например, в теплый период года кабины с большой поверхностью остекления испытывают повышенный теплоприток за счет солнечной инсоляции. Тепло может поступать через теплопередачу – этот процесс зависит от разницы между температурой снаружи и внутри кабины, а также от характеристик ограждающих конструкций [7–9]. В течение рабочей смены теплопоступления неравномерны⁵, что обусловлено ориентацией кабины в пространстве, интенсивностью солнечной радиации, меняющейся в течение дня, конструкцией кабины МЭС, внешними климатическими факторами [10]. Неравномерность теплопоступлений от ограждающих поверхностей кабины и наружного воздуха требует разработки адаптивного алгоритма работы климатической установки, способного прогнозировать изменения теплопоступлений в кабину и заранее корректировать холодопроизводительность. При исследовании температурных условий в кабинах современных тракторов было выявлено их несоответствие оптимальным значениям, а также установлено, что алгоритм работы климатической установки неспособен быстро реагировать на изменение температурных условий. Для того чтобы обеспечить соответствующие температурные условия следует ввести интервальный контроль изменения температуры, по результатам которого будет устанавливаться необходимая холодопроизводительности климатической установки.

Целью исследования является создание и верификация алгоритма адаптивного управления климат-контролем кабины МЭС, позволяющего компенсировать неравномерность теплопоступлений за счет прогнозной корректировки холодопроизводительности на основе метода экспоненциального сглаживания.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Требования к микроклиматическим условиям в кабинах МЭС, обеспечивающие безопасность и комфортные условия труда оператора, регламентируются соответствующими нормативными документами, согласно которым оптимальная температура воздуха на рабочем месте составляет +18...+24 °С⁶, относительная

⁴ Панов Ю.А., Петров С.А. Влияние современных климатических установок транспортно-технологических машин на производительность и безопасность труда операторов. В: Повышение управленческого, экономического, социального, инновационно-технологического и технического потенциала предприятий и отраслей АПК: сб. научных трудов по материалам Междунар. науч.-практ. конф. Тверь: Изд-во Тверской ГСХА; 2017. С. 144–146.

⁵ Михайлов М.В., Гусева С.В. Микроклимат в кабинах мобильных машин. М.: Машиностроение; 1977. 230 с.

⁶ СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания: Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28 января 2021 № 2 [Электронный ресурс]. URL: <https://base.garant.ru/400274954/> (дата обращения: 22.06.2025).

влажность – 40–60 %⁷, скорость воздуха – не более 0,2 м/с⁸ [10; 11]. По данным Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека⁹ и Федеральной службы государственной статистики¹⁰ от 60 до 300 тыс. операторов МЭС нуждаются в улучшении условий труда. Вопросам улучшения условий труда за счет нормализации параметров микроклимата на рабочих местах посвящены исследования А. М. Кормина, М. В. Михайлова, В. И. Слепцова, А. В. Деревягина, А. В. Власова, М. А. Журавца, Ю. И. Аверьянова, В. В. Масленского, Y. Xie, H. Yin и др.

А. М. Кормин предложил нормализовать микроклимат в кабинах через совершенствование теплозащитных свойств, внедрение ограждений, вентилируемых прослоек и водоиспарительного охладителя¹¹. Обосновал способ теплозащиты путем экранирования ограждений и разработал жалюзи для окон, снижающие радиационную нагрузку. Определил эффект от специальных стекол и разработал алгоритмы расчета микроклимата¹². В. И. Слепцов разработал методику определения температурного режима на основе теплового баланса и предложил регулировать тепловой режим с помощью полупроводниковых термомодулей¹³. Ученым из Саратовского аграрного университета разработана и внедрена конструктивно-технологическая схема устройства для очистки вентиляции кабины и воздуха от пыли¹⁴. Разработана модель формирования микроклимата, на основании которой предложена сферическая форма кабины, значительно уменьшающая тепловой поток¹⁵. В свою очередь, В. В. Масленский предложил модель теплового излучения для кабин, учитывающую геометрию, излучение, конвекцию и теплопроводность¹⁶. Существует аналитический способ оценки тепловой нагрузки на

⁷ ГОСТ 12.1.005-88. Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200003608> (дата обращения: 15.06.2025).

⁸ Об утверждении методики проведения специальной оценки условий труда, классификатора вредных и (или) опасных производственных факторов, формы отчета о проведении специальной оценки условий труда и инструкции по ее заполнению.

⁹ О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2023 году: Государственный доклад. М.: 2024. 364 с. URL: <https://base.garant.ru/411027780/> (дата обращения: 18.06.2025).

¹⁰ Наличие техники, энергетических мощностей в сельскохозяйственных организациях Российской Федерации в 2023 году. М.: Федеральная служба государственной статистики (Росстат). Главный межрегиональный центр; 2024. URL: <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13277> (дата обращения: 24.06.2025).

¹¹ Кормин А.М. Улучшение условий труда механизаторов путем разработки методов оценки и способов совершенствования теплозащитных свойств кабин: дисс. ... канд. техн. наук. Орел; 2005. 158 с.

¹² Михайлов М.В. Улучшение условий и охраны труда операторов сельскохозяйственных машин с обоснованием методов выбора параметров микроклимата в кабинах и средств его обеспечения: дисс. ... д-р. техн. наук. М.; 1991. 315 с.

¹³ Слепцов В.И. Обоснование и разработка системы нормализации микроклимата кабин при обслуживании горнотранспортных машин на карьерах Севера: дисс. ... д-р. техн. наук. М.; 2002. 252 с.

¹⁴ Деревягин А.В. Разработка инженерных методов и технических средств обеспечения экологической безопасности в сельскохозяйственном производстве на примере зерноуборочного комбайна СК-5М «Нива»: дисс. ... канд. тех. наук. Саратов; 2005. 186 с.

¹⁵ Власов А.В. Улучшение условий труда операторов подъемно-транспортных машин при строительстве объектов АПК совершенствованием конструктивных особенностей кабин: дисс. ... канд. техн. наук. Ярославль; 2007. 213 с.

¹⁶ Масленский В.В. Улучшение условий труда операторов технологических и мобильных машин в условиях нагревающего микроклимата: дисс. ... канд. техн. наук. Ростов-на-Дону; 2021. 133 с.

оператора и конструкцию водоиспарительного охладителя с высоким холодильным коэффициентом¹⁷. Ю. И. Аверьяновым предложен интегральный критерий комфортности микроклимата и обоснована необходимость применения локальных терморегулирующих устройств¹⁸.

Зарубежными учеными создана динамическая тепловая модель системы кондиционирования воздуха (АС) автомобиля, учитывающая влияние скорости транспортного средства и внешних условий на теплообмен с салоном. Предложена и применена стратегия интеллектуального прогнозного управления (ИМРС), включающая модуль скорости автомобиля и адаптацию под тепловой комфорт пассажиров [12]. Разработана интегрированная модель на базе программ ANSYS Simplorer и ANSYS Fluent для совместного моделирования работы ECS и температурного режима салона, а также внедрения ПИД-регулятора для динамического управления температурой подаваемого воздуха с поддержанием стабильности в пределах $\pm 0,6$ К от заданной [13].

Существующие исследования предлагают разрозненные решения (теплозащита, охладители, фильтры) или специализированные модели. Однако для достижения гарантированного комфорта в динамически меняющихся условиях недостаточно улучшать отдельные компоненты. Требуется система, способная координировать их работу, выбирая оптимальный режим в каждый момент времени. Совершенствование средств нормализации микроклимата достигает предела своей эффективности без адекватной системы управления. Важной задачей становится разработка и внедрение адаптивных алгоритмов, способных получать данные от различных датчиков, прогнозировать тепловую нагрузку и динамично управлять всеми элементами климатической системы для поддержания заданного комфорта при минимальных энергозатратах. Это позволит создать оптимальные микроклиматические условия, что в конечном итоге будет способствовать повышению эффективности работы и сохранению здоровья работников сельского хозяйства.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве объекта исследования был принят процесс формирования микроклиматических условий в кабине МЭС, предмет исследования – зависимость изменения температуры в кабине МЭС.

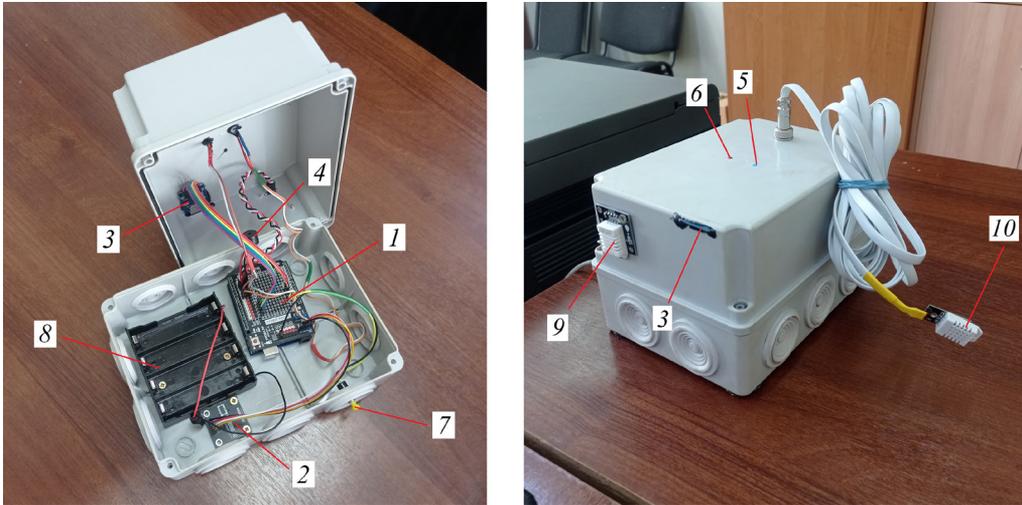
С целью подтверждения теоретических предпосылок возможности использованного разрабатываемого адаптивного алгоритма была создана экспериментальная установка и проведены исследования.

Экспериментальная установка состояла из измерительного устройства, расположенного в кабине трактора Т-150К (рис. 1). Оно представляет собой размещенную в прямоугольном корпусе плату 1 на основе микроконтроллера ATmega 328, часы реального времени 2 на базе микросхемы DS1307z, SPI адаптер 3 для карт MicroSD, пьезодинамик 4, два сигнальных светодиода 5, 6, кнопку перезагрузки 7

¹⁷ Журавец М.А. Разработка экологически безопасной системы охлаждения воздуха в кабинах лесных машин: дисс. ... канд. тех. наук. Воронеж; 2004. 179 с.

¹⁸ Аверьянов Ю.И. Улучшение условий труда операторов мобильных сельскохозяйственных машин применением локального терморегулирующего устройства: дисс. ... канд. техн. наук. Челябинск; 2000. 197 с.

и аккумуляторный блок 8. За короб вынесен внутренний датчик DHT22 для измерения температуры и относительной влажности в кабине 9, а также внешний датчик DHT22, выносимый за пределы кабины для измерения температуры и относительной влажности снаружи 10.



Р и с. 1. Измерительное устройство: 1 – плата на основе микроконтроллера ATmega 328; 2 – часы реального времени на базе микросхемы DS1307z; 3 – SPI адаптер для карт MicroSD; 4 – пьезодинамик; 5, 6 – сигнальный светодиод; 7 – кнопка перезагрузки; 8 – аккумуляторный блок; 9 – датчик DHT22 для измерения температуры и относительной влажности в кабине; 10 – внешний датчик DHT22 для измерения температуры и относительной влажности снаружи кабины

Fig. 1. Measuring device: 1 – ATmega 328 microcontroller board; 2 – real-time clock based on DS1307z chip; 3 – SPI adapter for microSD cards; 4 – piezodynamics; 5, 6 – signal LED; 7 – reset button; 8 – battery pack; 9 – DHT22 sensor for measuring temperature and relative humidity in the cabin; 10 – external sensor DHT22 for measuring temperature and relative humidity outside the cabin

Источник: фотографии сделаны С. А. Петровым при создании устройства в лаборатории технического сервиса Тверской ГСХА (г. Тверь, п. Сахарово, 2024).

Source: the photos were taken by S. A. Petrov when creating the device in the laboratory of technical service of the Tver State Agricultural Academy (Tver, Sakharovo settlement, 2024).

Методикой предусматривалось измерение и запись значений температуры воздуха снаружи и внутри кабины МЭС с интервалом в одну минуту (в течение рабочей смены оператора МЭС – 6 часов, в самый теплонагруженный период времени – с 11 до 17 часов). Полученные данные записывались на SD-карту, затем обрабатывались на персональном компьютере с помощью программного обеспечения. Для оценки расхождения теоретических расчетов и результатов эксперимента предусматривалось построение графиков.

Создание адаптивного алгоритма работы климатической установки опиралось на ряд теоретических предпосылок, включая уравнение теплового баланса кабины. Для эффективного управления микроклиматическими условиями в кабине МЭС необходимо учитывать соотношение между поступающим и отводимым из кабины

количеством теплоты. В летний период года основным естественным источником теплопоступления в кабины МЭС служит солнечная радиация, взаимодействующая с прозрачными и не прозрачными ограждениями. В настоящее время наиболее распространенным и эффективным способом снижения теплопоступлений остается использование систем вентиляции и кондиционирования воздуха, которые обеспечивают принудительное охлаждение воздуха в кабине. При этом количество теплоты, отводимое с помощью вентиляции и кондиционера $Q_{vnt.kl}$, в теплый период года определяли по следующей формуле:

$$Q_{vnt.kl} = Q_{kl} + Q_{vnt},$$

где Q_{kl} – количество теплоты, отводимое климатической установкой, Дж; Q_{vnt} – количество теплоты, отводимое вентиляцией, Дж.

Для определения количества теплоты, которое необходимо удалить из воздуха в кабине Q_{yd} , и понижения температуры с начальной температуры T_n до конечной температуры T_k применяли формулу [14; 15]:

$$Q_{yd} = c \cdot m \cdot (T_n - T_k),$$

где m – масса воздуха в кабине, кг; T_n – начальная температура воздуха, °С; T_k – конечная температура воздуха, °С; c – удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·°С).

Удаление количества теплоты происходит за счет вентиляции, т. е. замещением теплого воздуха более холодным, и с помощью рециркуляции – охлаждения находящегося в кабине воздуха за счет пропускания через испаритель кондиционера. Часто применяется смешанный режим (режим частичной рециркуляции) – часть воздуха берется из окружающей среды, часть из внутреннего пространства кабины.

Для нахождения необходимой холодопроизводительности климатической установки¹⁹ $Q'_{vnt.kl}$ воспользовались формулой [16; 17]:

$$Q'_{vnt.kl} = G \cdot c \cdot (T_n - T_k), \quad (1)$$

где G – массовый расход воздуха, кг/с.

Массовый расход воздуха²⁰ G нашли по следующей формуле [7]:

$$G = v \cdot A \cdot \rho,$$

где ρ – плотность воздуха, кг/м³; A – площадь поперечного сечения воздухопровода, м²; v – скорость воздушного потока, м/с.

В кабине МЭС с помощью вентиляции создавалось избыточное давление на 10–30 Па выше атмосферного²¹. Воздух из кабины выходил не только через вентиляционные окна, но и через неплотности кабины. Для того, чтобы найти затраты холодопроизводительности климатической установки на эксфильтрацию, выяснили массовый расход эксфильтрируемого воздуха²² G_{eji} :

¹⁹ Алексеев Г.Н. Общая теплотехника. М.: Высшая школа; 1980. 552 с.

²⁰ Богословский В.Н., Кокорин О.Я., Петров Л.В. Кондиционирование воздуха и холодоснабжение: учебник для вузов. М.: Стройиздат; 1985. 367 с.

²¹ Хохряков В.П. Вентиляция, отопление и обеспыливание воздуха в кабинах автомобилей. М.: Машиностроение; 1987. 150 с.

²² Лях Г.Д., Смола В.И. Кондиционирование воздуха в кабинах транспортных средств. М.: Металлургия; 1982. 128 с.

$$G_{e/i} = v_e \cdot A_{ls} \cdot \rho,$$

где v_e – скорость эксфильтрируемого воздушного потока, м/с, A_{ls} – площадь поперечного сечения неплотностей, м².

Зная разницу давлений в кабине и снаружи кабины ΔP , определили скорость эксфильтрируемого воздушного потока²³ v_e :

$$v_e = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}},$$

где ΔP – разность давлений внутри кабины и снаружи, Па.

Подставляя полученные значения в формулу (1), получили выражение для нахождения холодопроизводительности, затрачиваемой на эксфильтрацию воздуха $Q_{e/i}$ [14; 18]:

$$Q_{e/i} = G_{e/i} \cdot c \cdot (T_n - T_k),$$

Тогда общее количество теплоты $Q_{yd.o}$, которое необходимо удалить из воздуха равно:

$$Q_{yd.o} = Q_{yd} \pm Q_{e/i}.$$

В идеальных условиях $Q_{vnt.kl} = Q_{yd.o}$, однако необходимо учитывать теплопоступления от ограждений кабины $Q_{e,s}$ и их неравномерность, поэтому действительное значение $Q_{vnt.kl}$ должно быть больше $Q_{yd.o}$.

Затраты холодопроизводительности на конденсацию влаги из воздуха Q_{cn} нашли из формулы удельной теплоты парообразования и конденсации²⁴ [14]:

$$Q_{cn} = m \cdot L,$$

где m – масса влаги в воздухе, кг; L – удельная теплота парообразования или конденсации, Дж/кг.

Зная действительную холодопроизводительность климатической установки $Q_{ins.d}$ и количество теплоты от ограждающих поверхностей $Q_{e,s}$, а также количество теплоты, затраченное на конденсацию жидкости, рассчитали эффективную холодопроизводительность установки Q_{ef} , затрачиваемую на охлаждение воздуха:

$$Q_{ef} = Q_{ins.d} - Q_{e,s} - Q_{cn}.$$

Для нахождения времени t_{coo} изменения температуры воздуха с начальной T_n до конечной T_k применили следующую формулу:

$$t_{coo} = \frac{Q_{yd.o}}{Q_{ef}}.$$

Время t_{coo} необходимо для снижения температуры в кабине МЭС до уровня соответствующего нормативным показателям. Далее эффективная

²³ Левцев А.П., Лысяков А.И. Расчет пароконденсаторных холодильных установок: учеб. пособие. Саранск: Изд-во Мордовского ун-та; 2014. 100 с.

²⁴ Ефимов А.Ю., Агеев В.А., Полковников Н.Ф. Расчет системы воздухообеспечения и систем вентиляции промышленных предприятий: учеб. пособие. Саранск: Изд-во Мордовского ун-та; 2009. 56 с.

холодопроизводительность тратилась на поддержание нормативных температурных условий, т. е. на ограничение теплопоступлений от ограждающих конструкций. Однако неравномерность теплопоступлений поверхностей кабины и наружного воздуха требовала такого алгоритма работы климатической установки, который способен прогнозировать их изменения и своевременно корректировать холодопроизводительность.

Для определения текущей холодопроизводительности Q_d климатической установки кабины МЭС в данный момент времени при теоретических расчетах использовали формулу:

$$Q_d = G \cdot c \cdot (T_{a.nar2} - T_{a.vn2}), \quad (2)$$

где G – массовый расход воздуха через испаритель климатической установки, кг/час; c – удельная теплоемкость воздуха, кДж/(кг·°C); $T_{a.nar2}$ – текущее значение температуры наружного воздуха, °C; $T_{a.vn2}$ – текущее значение температуры воздуха в кабине, °C.

Как видим из формулы (2) для определения холодопроизводительности климатической установки необходимо знать разность температур наружного воздуха $T_{a.nar2}$ и воздуха в кабине $T_{a.vn2}$.

Для расчета прогнозируемой холодопроизводительности Q_p заменили температуру воздуха в кабине $T_{a.vn2}$ на прогнозируемое значение температуры T_p :

$$Q_p = G \cdot c \cdot (T_{a.nar2} - T_p). \quad (3)$$

Для прогнозирования температуры воздуха в кабине трактора T_p воспользовались методом экспоненциального сглаживания. Данный метод базируется на принципе различной весомости исторических данных, где более новым измерениям присваивается повышенный коэффициент значимости, а вес устаревающих данных снижается экспоненциально. Формула для расчета прогнозируемой температуры T_p воздуха в кабине выглядит следующим образом:

$$T_p = 0,9 \cdot T_{a.vn2} + 0,1 \cdot T_{a.vn1}, \quad (4)$$

где $T_{a.vn1}$ – предыдущее значение температуры воздуха в кабине трактора, °C; 0,9 и 0,1 – соответственно вес текущего и прошлого значения температуры.

Как показала практика, оптимальный временной интервал для наиболее точного прогнозирования температуры T_p составляет 1 минуту. Учитывая тот факт, что прогнозирование наружной температуры $T_{a.nar.i}$ в краткосрочном периоде (1 минута) нецелесообразно из-за ее большой инертности, то для расчета прогнозируемой холодопроизводительности Q_p воспользовались предыдущим значением наружной температуры $T_{a.nar1}$. Объединяя формулы (3) и (4), получили:

$$Q_p = G \cdot c \cdot (T_{a.vn1} \pm \sigma_{a.nar} - (0,9 \cdot T_{a.vn2} + 0,1 \cdot T_{a.vn1})), \quad (5)$$

где $T_{a.nar1}$ – предыдущее значение температуры наружного воздуха, °C, $\sigma_{a.nar}$ – отклонение значения температуры наружного воздуха, °C.

Прогнозируемая холодопроизводительность Q_p учитывала тепловое воздействие не только ограждающих конструкций кабины, но и воздействие эксфильтрации. Первые две минуты работы климатической установки, ее

холодопроизводительность была максимальная. Это необходимо для того, чтобы снизить температуру воздуха до нормативных параметров. Затем климатическая установка начала работать по алгоритму, представленному формулой (5).

Произвели теоретический расчет прогнозируемой температуры T_p и холодопроизводительности Q_p согласно формулам (4) и (5) и исходным данным, представленными в таблице.

Т а б л и ц а
T a b l e

Исходные данные для расчета
Initial data for calculation

| Текущее значение температуры воздуха в кабине $T_{a.vn2}$, °C / Current value of air temperature in the cabin $T_{a.vn2}$, °C | Предыдущее значение температуры воздуха в кабине трактора $T_{a.vn1}$, °C / Previous value of air temperature in the tractor cabin $T_{a.vn1}$, °C | Предыдущее значение температуры наружного воздуха $T_{a.vn1}$, °C / Previous value of outside air temperature $T_{a.vn1}$, °C | Отклонение значения температуры наружного воздуха $\sigma_{a.nar}$, °C / Deviation of the outside air temperature value $\sigma_{a.nar}$, °C | Удельная теплоемкость воздуха c , кДж/(кг·°C) / Specific heat capacity of air c , kJ/(kg·°C) | Массовый расход воздуха через испаритель климатической установки G , кг/час / Air mass flow through the evaporator of climate control system G , kg/h |
|--|---|--|---|---|--|
| 28,58 | 28,7 | 30,6 | 0,1 | 1005 | 0,0313 |

Полученные данные аппроксимированы с помощью интерполяционного полинома Лагранжа и представлены в виде следующих математических моделей:

– для прогнозируемой температуры T_p :

$$y = -2 \cdot 10^{-8} \cdot x^4 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot x^3 - 0,0038 \cdot x^2 + 0,3094 \cdot x + 28,395$$

– для прогнозируемой холодопроизводительности Q_p :

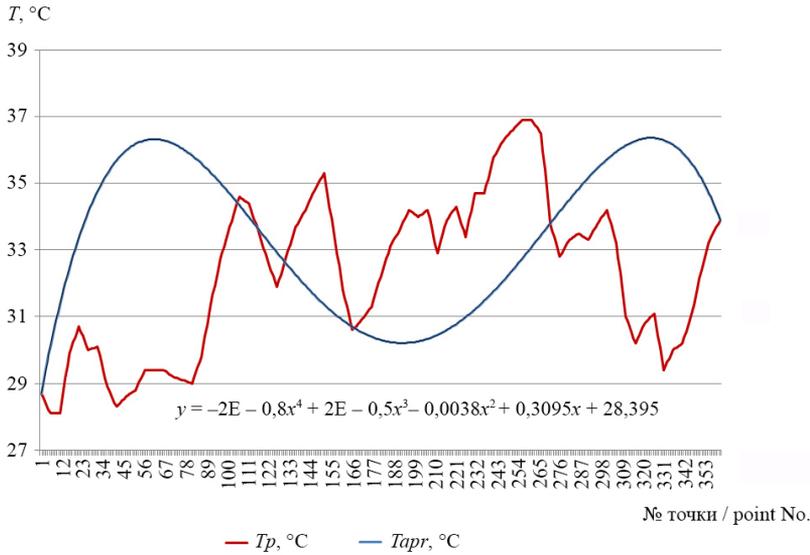
$$y = -4 \cdot 10^{-7} \cdot x^4 + 0,0003 \cdot x^3 - 0,666 \cdot x^2 + 4,8105 \cdot x + 72,591$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По полученным данным построены графики прогнозируемой температуры T_p и холодопроизводительности Q_p , а так же аппроксимированных значений (рис. 2, 3).

С помощью аппроксимации описали изменение температуры и холодопроизводительности полиномом меньшей степени с приемлемой точностью.

Для оценки расхождения прогнозируемых и экспериментальных данных температуры и холодопроизводительности в кабине МЭС провели сравнительный анализ. Для этого рассчитали прогнозируемые значения температуры T_p воздуха и холодопроизводительности Q_p в кабине, полученные по формулам (4) и (5), и сравнили их с экспериментально полученными значениями температуры $T_{a.vn}$ воздуха и холодопроизводительности Q_d в кабине МЭС. Результаты анализа представлены на рисунках 4 и 5, для наглядности на рисунках указано 60 измерений из 360.

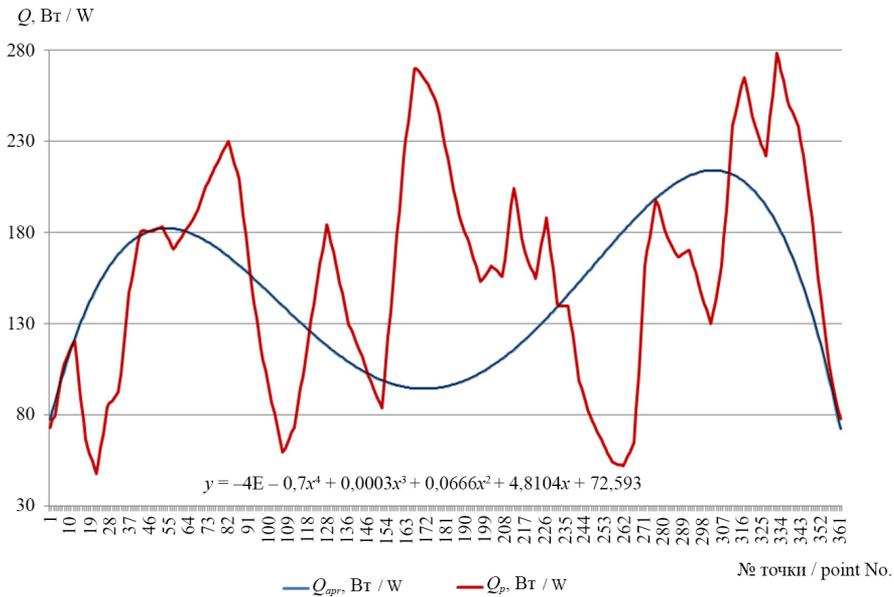


Р и с. 2. Графики изменения прогнозируемых T_p и аппроксимированных T_{apr} значений температуры

F i g. 2. Graphs of changes in forecasted T_p and approximated T_{apr} temperature values

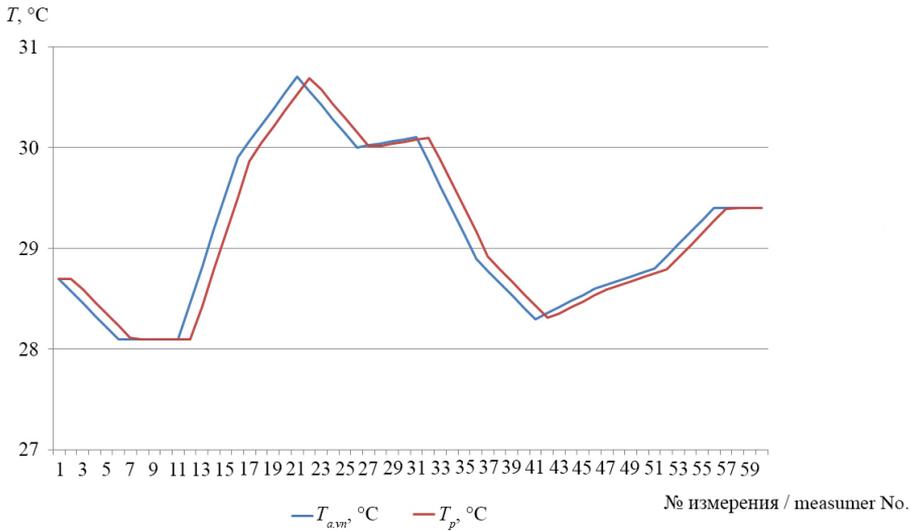
Источник: графики для рисунков 2–5 составлены авторами статьи в программе Microsoft Excel.

Source: the graphs for figures 2–5 were compiled by the authors of the article in the program Microsoft Excel.



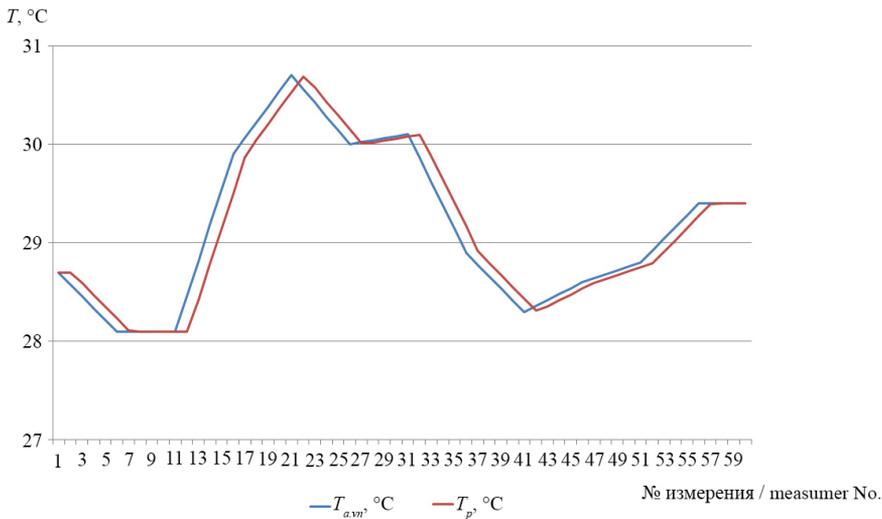
Р и с. 3. Графики изменения прогнозируемых Q_p и аппроксимированных Q_{apr} значений холодопроизводительности

F i g. 3. Graphs of changes in the forecasted Q_p and approximated Q_{apr} values of cooling capacity



Р и с. 4. Графики прогнозируемых значений температуры T_p и экспериментально полученных значений температуры T_{avn} .

Fig. 4. Graphs of forecasted temperature values T_p and experimentally obtained temperature values T_{avn} .



Р и с. 5. Графики прогнозируемых значений холодопроизводительности Q_p и текущих значений холодопроизводительности Q_d .

Fig. 5. Graphs of forecasted cooling capacity values Q_p and current cooling capacity values Q_d .

Расхождение экспериментальных и прогнозируемых значений температур составила 2 %. На графике (рис. 4) видно, что кривая расчетных значений полностью повторяет кривую истинных значений. Расхождение текущих

и прогнозируемых значений холодопроизводительности составила 5 %, кривая холодопроизводительности по расчетным значениям несущественно отклоняется от кривой холодопроизводительности по истинным значениям и повторяет тенденцию ее изменения (рис. 5).

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты данного исследования позволяют сделать вывод о том, что цель работы была достигнута. В основу адаптивного алгоритма работы климатической установки кабины МЭС положен метод экспоненциального сглаживания, который продемонстрировал высокую эффективность для краткосрочного (одноминутного) прогнозирования температуры воздуха в кабине и требуемой холодопроизводительности системы. Интерпретация полученных данных (рис. 4, 5) показывает, что расхождение между прогнозируемыми и экспериментальными значениями температуры составляет всего 2 %, а для холодопроизводительности – 5 %. Такая точность свидетельствует о том, что алгоритм адекватно отражает динамику тепловых процессов в кабине трактора Т-150К и может быть положен в основу системы управления климатической установкой различных МЭС.

Как и в работах зарубежных коллег, ключевой идеей является прогнозирование управления микроклиматом для повышения комфорта и энергоэффективности. Однако, в отличие от сложных интегрированных моделей, требующих значительных вычислительных ресурсов, представленный алгоритм предлагает прагматичное и вычислительно простое решение, основанное на модификации классического уравнения теплового баланса с использованием доступного метода экспоненциального сглаживания. В отличие от исследований, направленных на модернизацию конструктивных элементов кабины, данный алгоритм фокусируется на оптимизации управления существующей системой, что может быть реализовано с минимальными аппаратными доработками.

К сильным сторонам исследования можно отнести простоту реализации алгоритма и высокую точность прогноза. К недостаткам исследования относится то, что алгоритм в первую очередь оценивает температуру в кабине, влияние других факторов оценивается через уравнение теплового баланса.

Разработанный алгоритм имеет практическую ценность для сельскохозяйственной и транспортной отрасли, его внедрение позволит автоматически поддерживать микроклимат в кабине МЭС в оптимальном диапазоне, повышая производительность и безопасность труда оператора. Благодаря простоте интеграции в системы управления, данный алгоритм может быть адаптирован для использования на широком спектре мобильных энергетических средств.

Перспективы дальнейших исследований заключаются в расширении модели за счет учета влажности и скорости воздуха для более точной оценки микроклимата. Важным шагом станет включение алгоритма в контур системы управления климатической установкой, а также в общий контур интеллектуальной системы управления агрегатом. Это позволит создать комплексную систему, оптимизирующую как условия труда оператора, так и общую энергоэффективность агрегата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ворохобин А.В., Журавец И.Б., Манойлина С.З., Золотых Е.Д. Термическая стабилизация микроклимата в кабине сельскохозяйственного мобильного энергетического средства. *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. 2021;14(3):64–69. https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2021_3_64
2. Shirokov Y., Kovrigo O., Ryabchikova V. Influence of Working Conditions in Agricultural Enterprises on Fatigue and Labor Productivity. In: E3S Web of Conferences. Rostov-on-Don. 2021. Article no. 12024. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202127312024>
3. Glemba K.V., Averianov Y.I. Substantiation of Parameters and Operation Modes of Device for Thermal Comfort of a Mobile Machine Operator. In: International Conference on Industrial Engineering. Chelyabinsk. 2015. P. 542–548. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.055>
4. Баланов И.А., Булыгин Ю.И., Ашихмин Д.В., Гуменюк А.С., Финоченко Т.А. Статистический анализ параметров микроклимата в кабинах путевых машин. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2023;(9):111–118. URL: <https://tidings.tsu.tula.ru/tidings/index.php?id=technical&lang=ru&year=1> (дата обращения: 15.06.2025).
5. Marchetti E., Capone P., Freda D. Climate Change Impact on Microclimate of Work Environment Related to Occupational Health and Productivity. *Annali dell Istituto Superiore di Sanita*. 2016;52(3):338–342. https://doi.org/10.4415/ANN_16_03_05
6. Dasgupta S., Maanen N., Gosling P.S.N., Piontek F., Otto C., Schleussner C.-F. Effects of Climate Change on Combined Labour Productivity and Supply: an Empirical, Multi-Model Study. *The Lancet Planetary Health*. 2021;5(7):e455–e465. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(21\)00170-4](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(21)00170-4)
7. Zewdie R., Kic P. Substantial Factors Influencing Drivers' Comfort in Transportation. *Agronomy Research*. 2017;15(5):2236–2246. <https://doi.org/10.15159/AR.17.037>
8. Масленский В.В., Булыгин Ю.И. Улучшение условий труда механизаторов-комбайнеров при воздействии интенсивного солнечного излучения. *Вестник аграрной науки Дона*. 2024;17(3):62–71. https://doi.org/10.55618/20756704_2024_17_3_62-71
9. Wu J., Jiang F., Song H., Liu C., Lu B. Analysis and Validation of Transient Thermal Model for Automobile Cabin. *Applied Thermal Engineering*. 2017;(122):91–102. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.03.084>
10. Аверьянов Ю.И., Глемба К.В., Гриценко А.В. Повышение комфортного состояния производственной среды наземных транспортно-технологических машин оптимизацией температурного энергодобавления микроклимата. *АПК России*. 2020;27(1):45–59. URL: <https://rusapk.sursau.ru/archive/1075/> (дата обращения: 04.04.2025).
11. Масленский В.В., Булыгин Ю.И. Конечный-элементный анализ параметров микроклимата в кабине металлургического крана. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2021;(1):10–20. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2021-1-10-20>
12. Xie Y., Liu Z., Li K., Liu J., Zhang Y., Dan D. и др. An Improved Intelligent Model Predictive Controller for Cooling System of Electric Vehicle. *Applied Thermal Engineering*. 2021;(182). Article no. 116084. <http://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116084>
13. Lan F., Chen H., Chen J., Li W. Effect of Urban Microclimates on Dynamic Thermal Characteristics of a Vehicle Cabin. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2023;(49). Article no. 103162. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103162>
14. Yin H., Shen X., Huang Y., Feng Z., Long Z., Duan R. и др. Modeling Dynamic Responses of Aircraft Environmental Control Systems by Coupling with Cabin Thermal Environment Simulations. *Building Simulation*. 2016;(9):459–468. <https://doi.org/10.1007/s12273-016-0278-3>
15. Булыгин Ю.И., Щекина Е.В., Масленский В.В. Разработка элементов системы нормализации микроклимата в кабине зерноуборочного комбайна tozum. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2019;(2):2–12. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2019-2-2-12>
16. Месхи Б.Ч., Булыгин Ю.И., Масленский В.В., Лоскутникова И.Н. Оценка терморрадиационного режима рабочего места крановщика в целях обоснованного выбора климатической системы

- кабины металлургического крана. *Безопасность труда в промышленности*. 2021;(2):7–14. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2021-2-7-14>
17. Манойлина С.З., Оробинский В.И. Повышение эффективности кондиционирования воздуха в кабине транспортного средств. *Наука в центральной России*. 2024;(4):17–30. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-4-17-30>
18. Zhang Y., Li Z., Liu S., Wang G., Chang H. A Study of Passenger Car Cabin Pre-Ventilation Under the Sun. *Energies*. 2023;16(20):7154. <https://doi.org/10.3390/en16207154>

REFERENCES

1. Vorokhobin A.V., Zhuravets I.B., Manolina S.Z., Zolotykh E.D. Thermal Stabilization of the Microclimate in the Cabin of Mobile Energy Machinery Used in Agriculture. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2021;14(3):64–69. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2021_3_64
2. Shirokov Y., Kovrigo O., Ryabchikova V. Influence of Working Conditions in Agricultural Enterprises on Fatigue and Labor Productivity. In: E3S Web of Conferences. Rostov-on-Don. 2021. Article no. 12024. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202127312024>
3. Glemba K.V., Averianov Y.I. Substantiation of Parameters and Operation Modes of Device for Thermal Comfort of a Mobile Machine Operator. In: International Conference on Industrial Engineering. Chelyabinsk. 2015. P. 542–548. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.055>
4. Balanov I.A., Bulygin Yu.I., Ashikhmin D.V., Gumenyuk A.S., Finochenko T.A. Statistical Analysis of Microclimate Parameters in the Cabins of Track Machines. *Izvestiya Tula State University. Technical sciences*. 2023;(9):111–118. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://tidings.tsu.tula.ru/tidings/index.php?id=technical&lang=ru&year=1> (accessed 15.06.2025).
5. Marchetti E., Capone P., Freda D. Climate Change Impact on Microclimate of Work Environment Related to Occupational Health and Productivity. *Annali dell Istituto Superiore di Sanita*. 2016;52(3):338–342. https://doi.org/10.4415/ANN_16_03_05
6. Dasgupta S., Maanen N., Gosling P.S.N., Piontek F., Otto C., Schleussner C.-F. Effects of Climate Change on Combined Labour Productivity and Supply: an Empirical, Multi-Model Study. *The Lancet Planetary Health*. 2021;5(7):e455–e465. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(21\)00170-4](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(21)00170-4)
7. Zewdie R., Kic P. Substantial Factors Influencing Drivers' Comfort in Transportation. *Agronomy Research*. 2017;15(5):2236–2246. <https://doi.org/10.15159/AR.17.037>
8. Maslensky V.V., Bulygin Yu.I. Improving the Working Conditions of Combine Harvester Operators When Exposed to Intense Solar Radiation. *Vestnik Agrarnoj nauki Dona*. 2024;17(3):62–71. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.55618/20756704_2024_17_3_62-71
9. Wu J., Jiang F., Song H., Liu C., Lu B. Analysis and Validation of Transient Thermal Model for Automobile Cabin. *Applied Thermal Engineering*. 2017;(122):91–102. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.03.084>
10. Averyanov Yu.I., Glemba K.V., Gritsenko A.V. Improving the Comfortable State of the Production Environment of Ground Transportation and Technological Machines by Optimizing the Temperature Energy Balance of the Microclimate. *Agro-Industrial Complex of Russia*. 2020;27(1):45–59. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://rusapk.sursau.ru/arhive/1075/> (accessed 04.04.2025).
11. Maslenskiy V.V., Bulygin Yu.I. Finite Element Analysis of Microclimate Parameters in the Metallurgical Crane Cabin. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2021;(1):10–20. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2021-1-10-20>
12. Xie Y., Liu Z., Li K., Liu J., Zhang Y., Dan D., et al. An Improved Intelligent Model Predictive Controller for Cooling System of Electric Vehicle. *Applied Thermal Engineering*. 2021;(182). Article no. 116084. <http://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116084>
13. Lan F., Chen H., Chen J., Li W. Effect of Urban Microclimates on Dynamic Thermal Characteristics of a Vehicle Cabin. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2023;(49). Article no. 103162. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103162>

14. Yin H., Shen X., Huang Y., Feng Z., Long Z., Duan R., et al. Modeling Dynamic Responses of Aircraft Environmental Control Systems by Coupling with Cabin Thermal Environment Simulations. *Building Simulation*. 2016;(9):459–468. <https://doi.org/10.1007/s12273-016-0278-3>
15. Bulygin Yu.I., Shchekina E.V., Maslenskiy V.V. Development of Microclimate Normalization System Elements in the Cabin of Torum Grain Harvester. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2019;(2):2–12. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2019-2-2-12>
16. Meskhi B.Ch., Bulygin Yu.I., Maslenskiy V.V., Loskutnikova I.N. Assessment of the Thermal Radiation Regime of the Crane Operator Workplace for Making the Reasonable Choice of the Climate System of the Metallurgical Crane Cabin. *Occupational Safety in Industry*. 2021;(2):7–14. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2021-2-7-14>
17. Manoilina S.Z., Orobinsky V.I. Improving the Efficiency of Air Conditioning in the Vehicle Cabin. *Science in the Central Russia*. 2024;(4):17–30. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-4-17-30>
18. Zhang Y., Li Z., Liu S., Wang G., Chang H. A Study of Passenger Car Cabin Pre-Ventilation Under the Sun. *Energies*. 2023;16(20):7154. <https://doi.org/10.3390/en16207154>

Об авторах:

Савельев Анатолий Петрович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0361-0827>, Scopus ID: 57220747901, Researcher ID: AAB-2078-2021, SPIN-код: 2865-2693, tbsap52@mail.ru

Джаббаров Нозим Исмоилович, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник отдела агроэкологии в растениеводстве Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (196625, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, п. Тярлево, Филътровское ш., д. 3), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8910-2625>, Researcher ID: A-7780-2019, SPIN-код: 5203-7086, nozimjon-59@mail.ru

Петров Сергей Алексеевич, доцент кафедры технической эксплуатации автомобилей Тверской государственной сельскохозяйственной академии (170904, Российская Федерация г. Тверь, ул. Маршала Василевского (Сахарово), д. 7), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4951-0645>, SPIN-код: 8160-8595, spetrov@tvgscha.ru

Вклад авторов:

А. П. Савельев – формулировка идеи исследования, целей и задач; контроль, лидерство и наставничество при планировании и проведении исследования.

Н. И. Джаббаров – контроль, лидерство и наставничество при планировании и проведении исследования.

С. А. Петров – 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 04.09.2025; поступила после рецензирования 22.10.2025;
принята к публикации 28.10.2025*

About the authors:

Anatoly P. Savelyev, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Life Safety, National Research Mordovian State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian

Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0361-0827>, Scopus ID: 57220747901, Researcher ID: AAB-2078-2021, SPIN code: 2865-2693, tbsap52@mail.ru

Nozim I. Jabborov, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Leading Researcher of the Department of Agroecology in Crop Production, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filitrovskoe Shosse, Tiarlevo, St. Petersburg 196625, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8910-2625>, Researcher ID: A-7780-2019, SPIN code: 5203-7086, nozimjon-59@mail.ru

Sergey A. Petrov, Associate Professor of the Department of Technical Operation of Automobiles, Tver State Agricultural Academy (7 Marshal Vasilevsky St., (Sakharovo), Tver 170904, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4951-0645>, SPIN code: 8160-8595, spetrov@tvgsa.ru

Authors contribution:

A. P. Savelyev – formulating ideas, objectives and aims of the study; oversight and leadership responsibility for the research activity planning and execution, including mentorship external to the core team.

N. I. Jabborov – oversight and leadership responsibility for the research activity planning and execution, including mentorship external to the core team.

S. A. Petrov – conducting the study, specifically performing the experiments and collecting data; preparing the manuscript, specifically visualizing the study results and data obtained.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 04.09.2025; revised 22.10.2025; accepted 28.10.2025

**ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ, ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ
И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ / ELECTRICAL TECHNOLOGY,
ELECTRICAL EQUIPMENT AND ENERGY CONSERVATION**<https://doi.org/10.15507/2658-4123.036.202601.158-182>EDN: <https://elibrary.ru/cyxaml>

УДК / UDK 621.1.016.4

*Оригинальная статья / Original article***Теплопередача через ограждающие
конструкции здания в условиях возрастания
температуры наружного воздуха
и пульсации температуры теплоносителя****А. П. Левцев** , **А. В. Ениватов***Национальный исследовательский**Мордовский государственный университет,**г. Саранск, Российская Федерация, <https://ror.org/0262qgk2>* *levtzevap@mail.ru**Аннотация*

Введение. В условиях роста цен на энергоносители и ужесточения экологических норм поиск скрытых резервов экономии становится критически важным. В последнее время для решения проблемы повышения энергоэффективности зданий предпочтение отдается системам отопления с прерывистым режимом работы, среди которых особое место занимает низкочастотная пульсация температуры теплоносителя в контурах системы отопления.

Цель исследования. Оценить влияние повышения температуры наружного воздуха и пульсации температуры теплоносителя на снижение плотности теплового потока через ограждающие конструкции здания индивидуальной постройки.

Материалы и методы. Экспериментальное исследование проводилось в условиях возрастания температуры наружного воздуха под действием солнечной радиации и пульсации температуры теплоносителя. Режим низкочастотной пульсации температуры теплоносителя в системе отопления здания воспроизводился в соответствии с запатентованной технологией. В контуры системы отопления периодически подавался горячий или охлажденный теплоноситель, частота и амплитуда которого изменялась в пределах соответственно 0,001–0,003 Гц и 10–20 °С в зависимости от температуры теплоносителя, а также наружного и внутреннего воздуха в отдельном помещении жилого дома. Система отопления дополнительно оборудовалась трехходовым регулирующим клапаном, узлом управления с датчиками температуры теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах, а также температуры наружного воздуха. Мониторинг параметров теплоносителя, температур наружного и внутреннего воздуха в помещении в точках измерения проводился с применением автоматизированной измерительной системы.

Результаты исследования. При традиционном способе подачи теплоносителя в контуры отопления разность температур внутреннего и наружного воздуха снижается на 4,6 °С, а при пульсации температуры теплоносителя на 6,9 °С. Превышение средних значений плотности теплового потока в зонах измерения температур

© Левцев А. П., Ениватов А. В., 2026

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

поверхности ограждающих конструкций при традиционном способе подачи теплоносителя в контуры системы отопления над средними значениями теплового потока при пульсации теплоносителя составляет от 34,49 % для зоны 2,5 м от пола до 47,42 % для зоны за отопительным прибором.

Обсуждение и заключение. Снижение плотности теплового потока при пульсации теплоносителя зависит от зоны измерения температур относительно поверхности ограждающих конструкций, максимальное значение зафиксировано за отопительным прибором. В связи с этим целесообразно размещать отопительные приборы на внутренних ограждающих конструкциях зданий.

Ключевые слова: теплопередача, тепловой поток, ограждающие конструкции, прерывистое отопление, низкочастотная пульсация температуры, теплоноситель

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Левцев А.П., Ениватов А.В. Теплопередача через ограждающие конструкции здания в условиях возрастания температуры наружного воздуха и пульсации температуры теплоносителя. *Инженерные технологии и системы.* 2026;36(1):158–182. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.036.202601.158-182>

Heat Transfer through Building Envelopes in the Conditions of Increasing Outdoor Air Temperature and Coolant Temperature Fluctuation

A. P. Levtshev[✉], A. V. Enivatov

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

✉ levtzevap@mail.ru

Abstract

Introduction. With rising energy prices and stricter environmental regulations, it is critical to find hidden savings economy. Recently, for improving building energy efficiency the preference is given to intermittent operation heating systems among which low-frequency fluctuation of the coolant temperature in the heating system circuits occupies a special place.

The Aim of the Study. The study is aimed at evaluating the effect of an increase in outdoor air temperature and the coolant temperature fluctuation on a decrease in the density of heat flow through the envelopes of an individual design constructed building.

Materials and Methods. The experimental study was conducted during increasing outdoor air temperature under the influence of solar radiation and coolant temperature fluctuation. Low-frequency coolant temperature fluctuation mode in the building heating system was simulated using the patented technology. To the heating system circuits, there was periodically supplied hot or cooled coolant, the frequency of which varied within 0.001–0.003 Hz and amplitude varied within 10–20 °C depending on the coolant temperature, and the outdoor and indoor air temperatures in a separate room of the residential building. The heating system was additionally equipped with a three-way control valve, a control unit with sensors for measuring coolant temperature in the supply and return pipes, and outdoor air temperature. The parameters of the coolant, the temperatures of the outdoor and indoor air in the room at the measuring points were monitored using an automated measuring system.

The Results of the Study. With the traditional method of coolant supplying to heating circuits, the temperature difference between indoor and outdoor air decreases by 4.6 °C, and with a fluctuation of the coolant temperature by 6.9 °C. When using the traditional method of supplying coolant to the heating system circuits, in the zones of measuring the

envelope surface temperatures the excess of the average values of the heat flux density over the average values of the heat flux during the coolant fluctuation ranges from 34.49% for the zone 2.5 m from the floor to 47.42% for the zone behind the heater.

Discussion and Conclusion. During the study, it was found that the decrease in heat flux density during the coolant fluctuation depends on the temperature measurement zone of the surface of the building envelope; the maximum value is fixed behind the heating device. Therefore, heating devices should be located on the internal building envelope.

Keywords: heat transfer, heat flow, enclosing structures, intermittent heating, low-frequency temperature pulsation, coolant

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

For citation: Levtsev A.P., Enivatov A.V. Heat Transfer through Building Envelopes in the Conditions of Increasing Outdoor Air Temperature and Coolant Temperature Fluctuation. *Engineering Technologies and Systems*. 2026;36(1):158–182. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.036.202601.158-182>

ВВЕДЕНИЕ

Стратегия повышения энергоэффективности зданий в России до 2035 года, закрепленная в Энергетической стратегии Российской Федерации¹ и госпрограмме «Энергосбережение»², направлена на снижение энергоемкости ВВП на 35 % к 2035 году от уровня 2019 года. Основные меры данной стратегии включают технологическое развитие отрасли, связанное с использованием современных материалов, утеплением контуров зданий, установкой автоматизированных узлов управления тепловой энергией. При этом использование современных материалов и утепление фасадов решает только часть проблемы повышения энергоэффективности зданий на стадии нового строительства и капремонта. Более масштабным является установка автоматизированных узлов управления теплопотреблением в зданиях. Данное мероприятие охватывает как новое строительство, так и здания старой постройки, однако широкое распространение пока не получило в силу того, что традиционные технологии дают эффект только там, где есть «перетоп». Исходя из этого, для значительной части зданий управление теплопотреблением осуществляется централизованно на источниках тепловой энергии или центральных тепловых пунктах. Среди способов управления теплопотреблением преобладает качественный способ с применением в тепловых узлах зданий традиционных смесительных элеваторных узлов. В дополнение к данному способу у отдельных потребителей может присутствовать и местное (индивидуальное) количественное регулирование расхода теплоносителя через отопительный прибор. Однако применение приборов индивидуального регулирования в условиях отсутствия индивидуальных узлов учета потребленной тепловой энергии теряет актуальность. Кроме того, индивидуальное регулирование температурного режима в отдельных помещениях зданий приводит к гидравлической разбалансировке системы

¹ Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года: Распоряжение Правительства РФ от 9 июня 2020 № 1523-р. [Электронный ресурс]. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_354840/ (дата обращения: 22.03.2025).

² Об утверждении комплексной государственной программы Российской Федерации «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности»: Постановление Правительства РФ от 9 сентября 2023 № 1473. [Электронный ресурс]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202309110012> (дата обращения: 22.03.2025).

отопления всего здания и, как следствие, к «перетопам» отдельных помещений, нивелируя потенциальную экономию тепловой энергии.

Среди автоматизированных узлов управления теплоснабжением в зданиях с «перетопом» неплохо зарекомендовали себя погодозависимые регуляторы. Отдельные образцы сочетают в себе способ управления по основному возмущающему воздействию (температуре наружного воздуха) и управление с обратной связью по температуре воздуха в помещении. В отдельных случаях обратная связь управления потреблением тепловой энергии увязывается с температурой теплоносителя, отводимой из системы отопления. Как показывает практика энергетических обследований общественных и жилых зданий погодозависимые регуляторы потребления тепловой энергии исчерпали свой потенциал и требуют поиска новых технологий для их дальнейшего развития.

Популярной становится технология прерывистого отопления [1–3]. Предельным случаем прерывистого отопления является метод низкочастотной пульсации температуры теплоносителя в контурах системы отопления здания. Суть данного способа заключается в периодической подаче в контуры отопления то горячего, то охлажденного теплоносителя с низкой частотой (0,001–0,003 Гц) и меняющейся амплитудой от 10 °С до 20 °С в зависимости от температуры в подающем и обратном трубопроводах системы отопления, а также температуры наружного и внутреннего воздуха в отдельном помещении жилого дома [4]. Данная технология отработывалась на жилом двухэтажном здании индивидуальной постройки, а затем прошла адаптацию на трех общественных многоэтажных зданиях. Полученные результаты по сравнительным расчетам плотности теплового потока для традиционного и пульсирующего режима, и в целом по теплоснабжению, показывают высокую перспективность данной технологии (снижение теплоснабжения 20 % и более).

Целью эксперимента является сопоставление теплового потока через ограждающие конструкции в традиционном режиме и в режиме низкочастотной пульсации температуры теплоносителя в системе отопления здания индивидуальной постройки.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Режимы регулирования систем централизованного теплоснабжения были описаны Е. Я. Соколовым³, А. Н., Сканами, Л. М. Маховым⁴ [5; 6]. Они также рассмотрели системы отопления зданий. Изучена динамика процессов в отопительных приборах и ограждающих конструкциях зданий, тепло-гидравлический режим в системах отопления⁵ [7; 8].

Схемные решения и техническая реализация различных систем регулирования теплоснабжением зданий исследованы отечественными учеными [9; 10]. Часть работ направлена на изучение вопросов эффективной эксплуатации зданий

³ Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети. М.: МЭИ; 1999. 472 с.

⁴ Сканами А.Н., Махов Л.М. Отопление. М.: АСВ; 2002. 576 с.

⁵ Туркин В.П. Автоматическое управление отоплением жилых зданий. М.: Стройиздат; 1987. 192 с.; Левцев А.П., Макеев А.Н. Импульсные системы тепло- и водоснабжения: моногр. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та; 2015. 172 с.

в нерабочее время (ночные и выходные часы)⁶ [11–13]. При таком использовании суммарная продолжительность периода, допускающая отклонение параметров микроклимата помещений, превышает период активной эксплуатации здания, при котором необходимы комфортные условия. Также представлены результаты адаптации технологии управления теплоснабжением на зданиях с теплоснабжением от централизованной системы⁷ [14; 15]. Рассмотрены вопросы отопления, вентиляции и кондиционирования с позиции теплофизики⁸ [16; 17].

Анализ исследований отечественных ученых позволяет сделать следующие выводы. Во-первых, экономия тепловой энергии может составлять не более 15–20 % от фактически складывающегося потребления тепловой энергии здания до реализации мероприятия. При этом оценка экономии осуществляется при приведении к единым условиям эксплуатации системы отопления, что практически недостижимо.

Во-вторых, экономия тепловой энергии достигается за счет ограничения (отклонений от комфортного теплового режима) в отдельных временных периодах суток и недель. При изменении внешних факторов (температура, влажность воздуха, скорость ветра) и инерционности системы управления теплоснабжением (регулирования) возникают периоды избыточной подачи тепловой энергии в здание («перетоп»). С данным явлением достаточно успешно справляется местная система погодозависимого регулирования. В кратковременных периодах «недотопота» микроклимат в помещениях обеспечивается аккумулирующей способностью здания, характеризующейся теплоустойчивостью. Следует отметить, что экономия тепловой энергии отдельным зданием, в котором осуществляется регулирование потребления тепловой энергии, приводит к гидравлической неустойчивости всей системы теплоснабжения и перерасходу тепла остальными зданиями, необорудованными погодозависимыми регуляторами.

В-третьих, применяемые технологические и технические решения регулирования температуры теплоносителя в системе отопления сводятся к ограничению расхода теплоносителя как из системы теплоснабжения, так и по контурам системы отопления. Возникающая гидравлическая разбалансировка системы теплоснабжения в целом и системы отопления в частности приводит к существенным «перетопам» или «недотопам» отдельных помещений и здания целиком.

Недостатки приведенных выше подходов управления теплоснабжением заключаются в отсутствии взаимосвязи теплофизических параметров

⁶ Табунчиков Ю.А., Бродач М.М. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий. М.: АВОК-ПРЕСС; 2002. 194 с.; Панферов С.В., Телегин А.И., Панферов В.И. Адаптивная система управления тепловым режимом зданий. В: Системы автоматизации в образовании, науке и производстве: материалы VII Всероссийской науч.-практ. конф. «Системы автоматизации в образовании, науке и производстве». Новокузнецк: СибГИУ; 2009. С. 224–228. <https://elibrary.ru/tgdwxl>

⁷ Левцев А.П., Ениватов А.В. Использование пульсаций температуры теплоносителя в системах отопления здания. В: Современные проблемы и решения в системах отопления, вентиляции и теплогоснабжения: сб. докладов II Всероссийской науч.-практ. конф., посвященной 100-летию со дня рождения профессора А. А. Ионина. М.: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет; 2024. С. 13–25. <https://elibrary.ru/narmra>

⁸ Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. М.: АВОК-ПРЕСС; 2006. 256 с.; Богословский В.Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха). М.: Высшая школа; 1982. 415 с.; Бурцев В.В., Климов А.М. Теплоаккумулирующая способность здания как критерий регулирования тепловой нагрузки. Энергетика, экология, надежность, безопасность. 2014; С. 149–152.

отапливаемых зданий и теплоэнергетических параметров теплоносителя. Параметры теплоносителя рассматриваются только с точки зрения эффективности работы теплопотребляющего оборудования, а не эффективности теплопотребления.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования

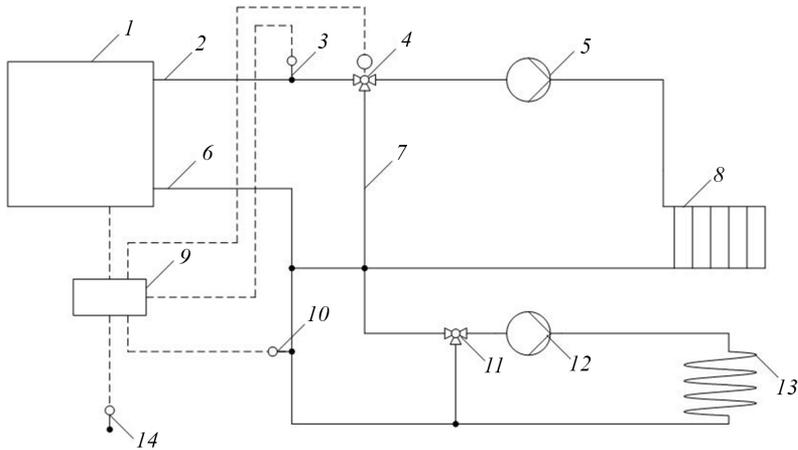
Объектом экспериментальных исследований являлось помещение площадью 36 м², расположенное на втором этаже дома индивидуальной постройки, ограждающие конструкции которого обращены на северо- и юго-запад. При этом на стене, обращенной на северо-запад, размещены оконные (световые) проемы из двойного стеклопакета. Система отопления представлена высокотемпературным контуром, включающим два отопительных секционных радиатора. Ограждающие конструкции включали кладку газобетона и облицовочного кирпича на песчано-цементном растворе с заливанием пустот между ними бетоном на основе керамической крошки. Это создавало зоны (точки) в ограждающей конструкции с различным термическим сопротивлением, что соответствовало программе эксперимента.

Предмет исследования – теплопередача через ограждающие конструкции здания в условиях возрастания температуры наружного воздуха и пульсации температур теплоносителя. В традиционном режиме пульсация температуры теплоносителя обусловлена инерционностью системы управления температурой в теплогенераторе.

Материалы и оборудование

Технологическая (тепловая) схема обеспечения тепловой энергией индивидуального жилого дома (на цели отопления) включала: теплогенератор 1; подающий и обратный трубопроводы системы отопления 2, 6; трехходовой регулирующий клапан 4; высокотемпературный 8 и низкотемпературный 13 контуры системы отопления; циркуляционные насосы 5 и 12 высокотемпературного и низкотемпературного контура; смесительный трехходовой кран 11; трубопровод подмешивания 7; датчик температуры охлажденного теплоносителя 10; узел управления 9; датчики температуры наружного воздуха 14 и теплоносителя в подающем трубопроводе 3 (рис. 1).

Управление теплопотреблением здания индивидуальной постройки осуществлялось изменением во времени частоты и амплитуды пульсации температуры, подаваемых в высокотемпературный контур 8 теплоносителя. Запись параметров теплоносителя (температура в подающем 2 и обратном 6 трубопроводах системы отопления от теплогенератора 1 и расход в подающем трубопроводе 2 системы отопления), температуры наружного и внутреннего воздуха в отдельном помещении жилого дома осуществлялась измерительной системой на базе контроллера L-CardE14-440, включающего датчики температуры и расхода. Измерение плотности теплового потока через ограждающие конструкции помещения и температур поверхности осуществлялось измерителями плотности теплового потока и температуры ИТП-МГ4.03/Х(У) «ПОТОК».



Р и с. 1. Технологическая (тепловая) схема обеспечения тепловой энергией на цели отопления индивидуального жилого дома:

- 1 – теплогенератор; 2, 6 – подающий и обратный трубопроводы системы отопления; 3 – датчик температуры теплоносителя в подающем трубопроводе; 4 – трехходовой регулирующий клапан; 5 – циркуляционный насос высокотемпературного контура; 7 – трубопровод подмешивания; 8 – высокотемпературный контур системы отопления; 9 – узел управления; 10 – датчик температуры охлажденного теплоносителя; 11 – смесительный трехходовой кран; 12 – циркуляционный насос низкотемпературного контура; 13 – низкотемпературный контур системы отопления; 14 – датчик температуры наружного воздуха

F i g. 1. Technological (thermal) scheme of providing thermal energy for heating an individual residential building:

- 1 – heat generator; 2, 6 – supply and return pipelines of the heating system; 3 – temperature sensor of the coolant in the supply pipeline; 4 – three-way control valve; 5 – circulation pump of a high-temperature circuit; 7 – mixing pipeline; 8 – high-temperature circuit of the heating system; 9 – control unit; 10 – temperature sensor of the cooled coolant; 11 – mixing three-way valve; 12 – circulation pump of the low-temperature circuit; 13 – low-temperature circuit of the heating system; 14 – outdoor temperature sensor

Источник: рисунок 1 взят из⁹
Source: figure 1 is taken from⁹

Методы исследования

Режим низкочастотной пульсации температуры теплоносителя в системе отопления здания в целом воспроизводился в соответствии с запатентованной технологией, согласно которой в контуры системы отопления периодически подается то горячий, то охлажденный теплоноситель с частотой 0,001–0,003 Гц и приращением амплитуды 10–20 °С в зависимости от температуры в подающем, обратном трубопроводах системы отопления и наружного и внутреннего воздуха в отдельном помещении жилого дома [4].

Измерения проводились в тот период работы системы отопления здания, когда пульсация температуры теплоносителя в контурах соответствовала выше описываемой технологии в режиме штатного управления температуры теплоносителя в теплогенераторе (традиционный способ).

⁹ Ениватов А.В., Левцев А.П. Использование пульсаций температуры теплоносителя в системах отопления зданий.

Процедура исследования

Период проводимых измерений (10.03.2022–11.03.2022) характеризуется изменениями температуры наружного воздуха. Так с 6:00 до 12:00 каждого дня из-за активной солнечной радиации наблюдался рост температуры наружного воздуха. Согласно таблице температура наружного воздуха, по данным открытых источников, с 6:00 по 15:00 повысилась соответственно с $-14,8$ °C до $-8,2$ °C к 12:00 часам и незначительно понизилась до $-10,8$ °C к 15:00 при работе системы и проведении измерений 10.03.2022. За то же время 11.03.2022 она повысилась с $-15,5$ °C до $-9,3$ °C к 12:00 часам и незначительно понизилась до $-10,9$ °C к 15:00. Скорость ветра в данное время 10.03.2022 составляла 7 м/с, направление – северо-восток; 11.03.2022 – $4-6$ м/с, направление – северо-восток, северный. Из данных показателей следует, что измерения проходили в сопоставимых условиях.

Т а б л и ц а
T a b l e

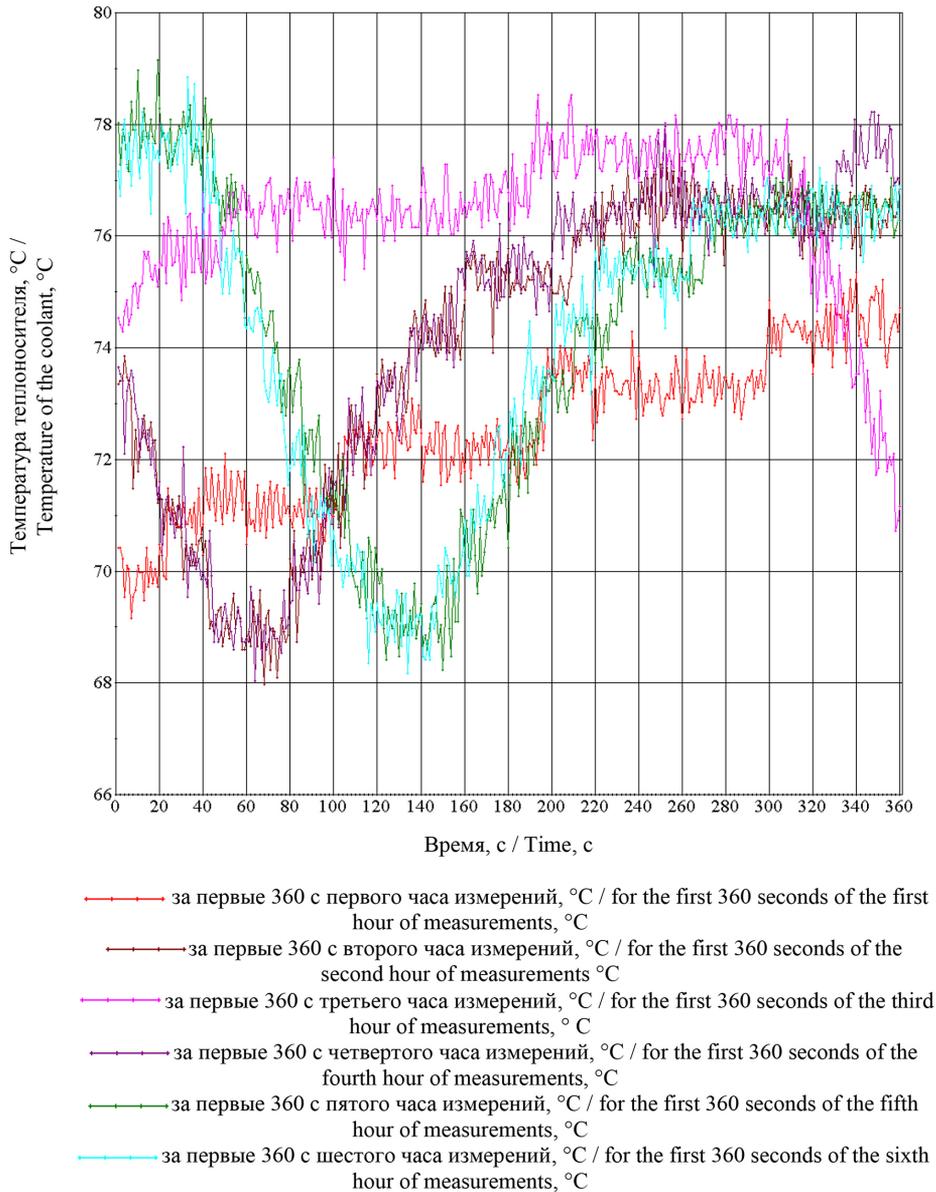
**Значения параметров наружного воздуха в г. Саранск
в период проведения эксперимента**
Values of outdoor air parameters in Saransk during the experiment

| Наименование параметра / Name of the parameter | Дата / Date | Значения по периодам времени / Values by time period | | | |
|---|----------------|--|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| | | 6:00 | 9:00 | 12:00 | 15:00 |
| Температура наружного воздуха, °C / Outdoor air temperature, °C | 10.03.2022 | $-14,80$ | $-11,30$ | $-8,20$ | $-10,80$ |
| | 11.03.2022 | $-15,50$ | $-12,00$ | $-9,30$ | $-10,90$ |
| Скорость ветра, м/с / Wind speed, m/s | 10.03.2022 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| | 11.03.2022 | 6 | 5 | 6 | 4 |
| Направление ветра / Wind direction | 10.03.2022 | северо- восток / northeast | северо- восток / northeast | северо- восток / northeast | северо- восток / northeast |
| | 11.03.2022 | северо- восток / northeast | северный / northern | северо- восток / northeast | северный / northern |

Сравнительная оценка теплового потока через ограждающие конструкции здания при работе теплогенератора на настроенных, в соответствии с температурным графиком $95/70$ °C, режимах (температура в подающем коллекторе на выходе из теплогенератора $+78$ °C... $+80$ °C); при отключенном, в традиционном режиме, трехходовым регулирующим клапане 4 и закрытом трубопроводе подмешивания 7.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты экспериментальных исследований управления режимом потребления тепловой энергии жилого здания от индивидуального теплоисточника представлены на графиках (рис. 2, 3).

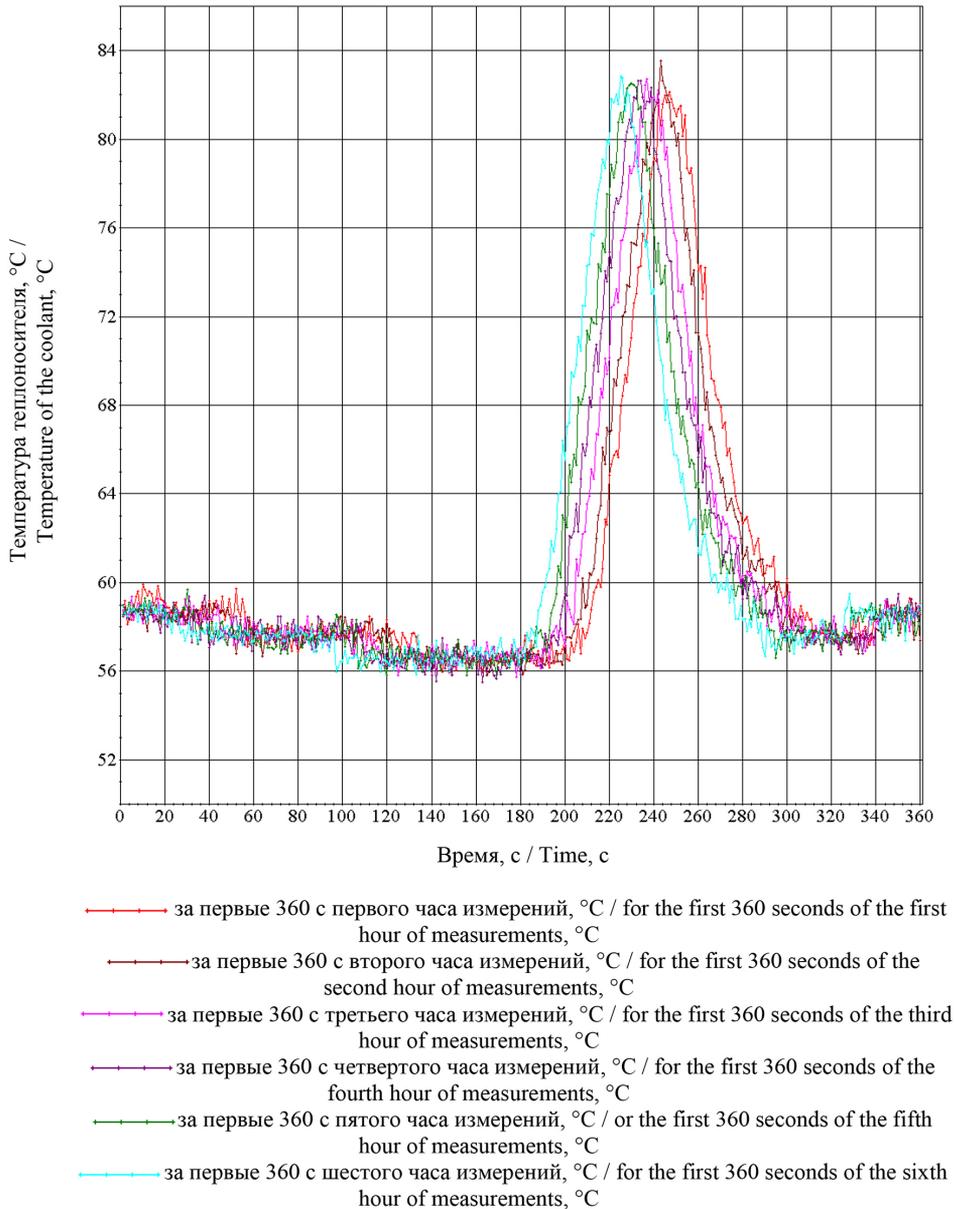


Р и с. 2. Температура теплоносителя в подающем трубопроводе высокотемпературного контура системы отопления при традиционном способе подачи теплоносителя (отрезки измерений продолжительностью 6 мин каждой из суммарной продолжительности измерения 6 часов)

Fig. 2. The coolant temperature in the supply pipeline of the high-temperature heating system circuit with the traditional method of coolant supply (measurement segments of 6 minutes each with a total measurement duration of 6 hours)

Источник: рисунки 2, 3 составлены авторами статьи в программе *Advanced Grapher 2.2*.

Source: figures 2 and 3 were created by the authors of the article using the *Advanced Grapher 2.2* program.



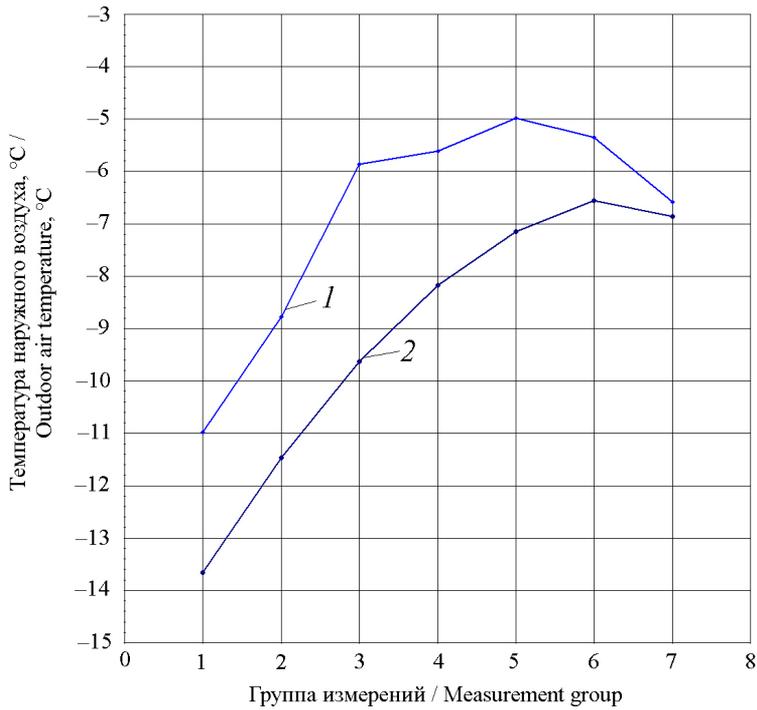
Р и с. 3. Температура теплоносителя в подающем трубопроводе высокотемпературного контура системы отопления при пульсации температуры теплоносителя с частотой 0,00278 Гц

F i g. 3. The coolant temperature in the supply pipeline of the high-temperature heating system circuit during the coolant temperature fluctuation with a frequency of 0.00278 Hz

При традиционном способе подачи (рис. 2), температура теплоносителя в подающем трубопроводе высокотемпературного контура находится в диапазоне $+68\dots+78$ °С и обусловлена инерционностью регулирования температуры теплоносителя в теплогенераторе. Период повышенных и пониженных от настроечных значений температур краткосрочен (не более 2–3 минут) и зависит от величины отклонения настроечной и расчетной температуры теплоносителя по температурному графику. Так для настроек при традиционном способе подачи теплоносителя продолжительность повышенных и пониженных значений соответственно составляют по 120–150 °С при общем отрезке цикла пульсации 560–600 °С (0,00167 Гц). При организации пульсации температуры теплоносителя в высокотемпературном контуре системы отопления с частотой 0,00278 Гц по описанной технологии продолжительность повышенных и пониженных значений от средних соответственно составляет 90 °С и 180 °С при общем отрезке цикла пульсации 360 °С. При этом продолжительность превышения температуры теплоносителя в подающем трубопроводе над расчетной температурой по температурному графику составляет не более 45 °С (рис. 3).

Средние значения температур внутреннего и наружного воздуха за каждый час измерения в период их роста представлены на рисунках 4 и 5. Температура наружного воздуха (рис. 4) в период измерения в режиме пульсации температуры теплоносителя (10.03.2022) подтверждает динамику температур наружного воздуха, приведенную в таблице и полученную по результатам анализа открытой информации с отклонением на 3–4 °С в большую сторону. Так, среднее часовое значение температуры в первый час измерения составляло $-13,663$ °С, и далее в последующие часы повышалась до $-6,855$ °С. Температура наружного воздуха 11.03.2022 при традиционном способе подачи теплоносителя также выше значений, приведенных в таблице: $-10,986$ °С в первый час измерения. Далее температура повышалась до $-4,982$ °С к 12 часам дня (по истечению 5 часов измерений) и снижалась до $-6,587$ °С к окончанию измерений.

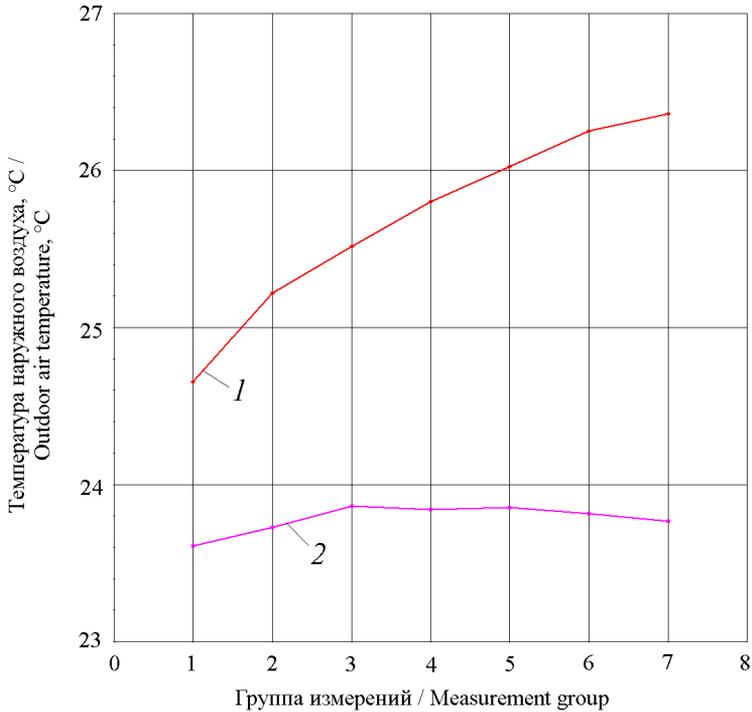
При теплоснабжении здания индивидуальной постройки в период измерения (10.03.2022) в пульсирующем режиме подачи теплоносителя, температура внутреннего воздуха (рис. 5) в течение первого часа росла с $+23,607$ °С до $+23,765$ °С и далее не выходила за область комфортных плановых значений ($+23\dots+24$ °С). Температура внутреннего воздуха, составляющая $+24,653$ °С в 7:00 утра 11.03.2022 превышала плановую (комфортную) температуру и к 12:00 при условии отсутствия погодозависимого управления достигла $+26,36$ °С.



Р и с. 4. Среднечасовые температуры наружного воздуха в период измерений 10.03.2022–11.03.2022:
1 – средние часовые (дата измерения: 11.03.2022);
2 – средние часовые (дата измерения: 10.03.2022)

F i g. 4. Average hourly outdoor temperatures during the measurement period of 10.03.2022–11.03.2022:
1 – average hourly (measurement date: 11.03.2022);
2 – average hourly (measurement date: 10.03.2022)

Источник: рисунки 4–13 составлены авторами статьи в программе *Advanced Grapher 2.2*.
Source: figures 4–13 were created by the authors of the article using the *Advanced Grapher 2.2* program.



Р и с. 5. Среднечасовые значения температуры внутреннего воздуха в помещении в период измерений 10.03.2022–11.03.2022:

1 – средние часовые (дата измерения: 11.03.2022);
 2 – средние часовые (дата измерения: 10.03.2022)

F i g. 5. Average hourly values of indoor air temperature during the measurement period 10.03.2022–11.03.2022:

1 – average hourly (measurement date: 11.03.2022);
 2 – average hourly (measurement date: 10.03.2022)

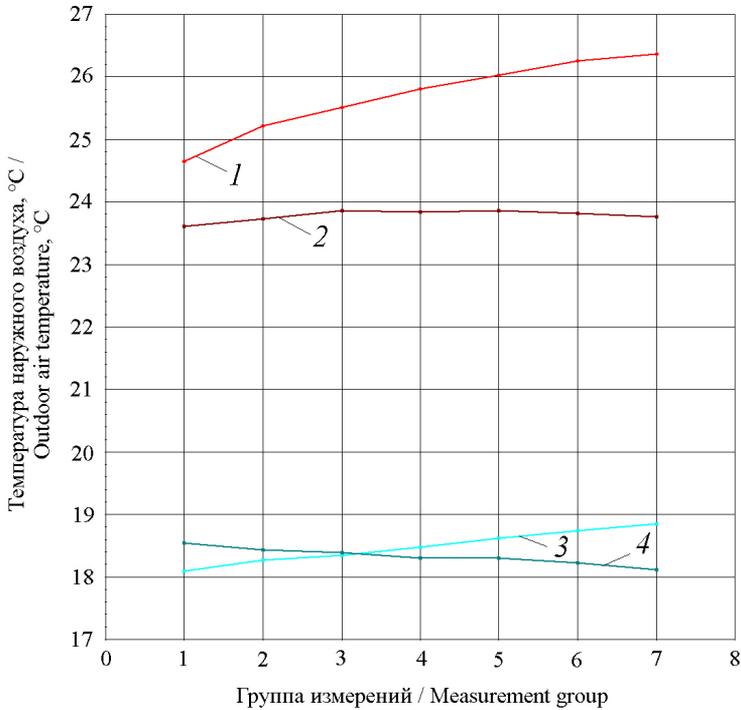
Графики изменения температуры на поверхности ограждающей конструкции на уровне 0,5 м, 1,5 м, 2,5 м от пола и за отопительным прибором представлены на рисунках 6–9. В условиях ощутимого роста температуры внутреннего воздуха с $+24,653\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+26,36\text{ }^{\circ}\text{C}$ (дата измерения: 11.03.2022) температура на поверхности ограждающей конструкции повышается:

- на уровне 0,5 м от пола с $+18,092\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+18,85\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- на уровне 1,5 м от пола с $+18,213\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+19,15\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- на уровне 2,5 м от пола с $+18,783\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+19,742\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- на поверхности за отопительным прибором с $+40,823\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+44,282\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Температура поверхности ограждающей конструкции в точках измерения 0,5 м, 1,5 м, 2,5 м от уровня пола при пульсации температуры теплоносителя (дата измерения: 10.03.2022) в условиях незначительного роста температуры внутреннего воздуха с $+23,607\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+23,765\text{ }^{\circ}\text{C}$ понижается:

- на уровне 0,5 м от пола с $+18,538\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+18,112\text{ }^{\circ}\text{C}$;

- на уровне 1,5 м от пола с +18,203 °С до +17,808 °С;
- на уровне 2,5 м от пола с +18,867 °С до +18,500 °С;
- на поверхности за отопительным прибором с 37,725 °С до 37,35 °С.

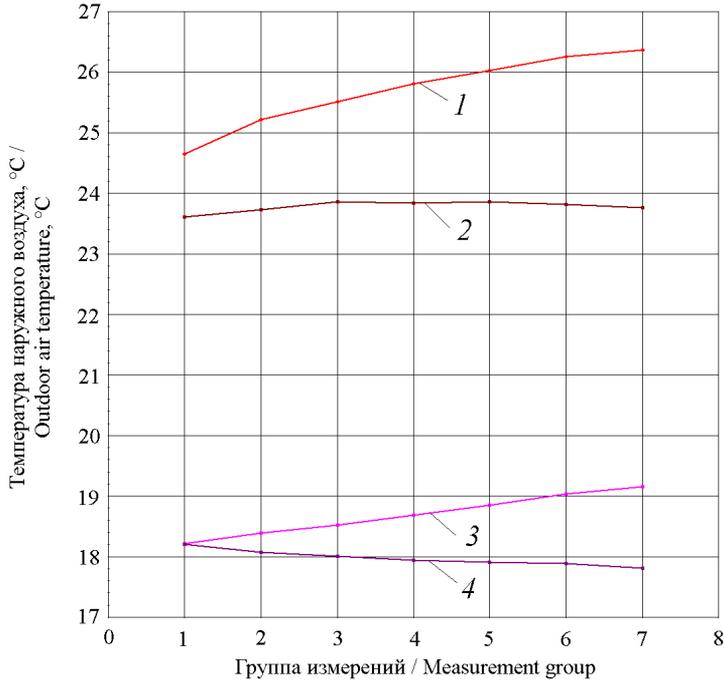


Р и с. 6. Среднечасовые значения температуры внутреннего воздуха и поверхности ограждающей конструкции на высоте 0,5 м от пола в помещении в период измерений 10.03.2022–11.03.2022:

- 1 – температура внутреннего воздуха (дата измерения: 11.03.2022);
 2 – температура внутреннего воздуха (дата измерения: 10.03.2022);
 3 – температура поверхности ограждающей конструкции на уровне 0,5 м от пола (дата измерения: 11.03.2022); 4 – температура поверхности ограждающей конструкции на уровне 0,5 м от пола (дата измерения: 10.03.2022)

F i g. 6. Average hourly values of the temperature of the indoor air and the surface of the envelope at a height of 0.5 m from the floor in the room during the measurement period 03.10.2022–03.11.2022:

- 1 – the temperature of the indoor air (date of measurement: 03.11.2022);
 2 – the temperature of the indoor air (date of measurement: 03.10.2022);
 3 – the temperature of the surface of the envelope at 0.5 m from the floor (date of measurement: 03.11.2022); 4 – surface temperature of the envelope at 0.5 m from the floor (date of measurement: 03.10.2022)

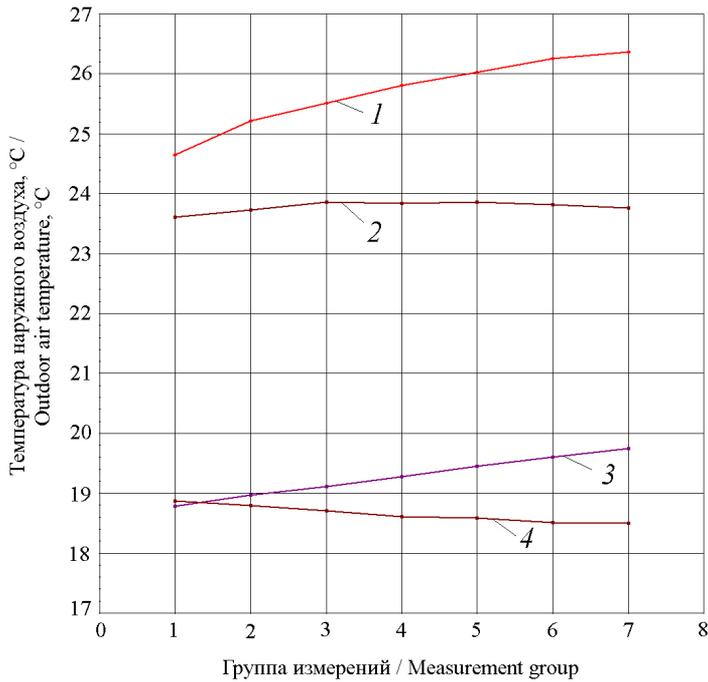


Р и с. 7. Среднечасовые значения температуры внутреннего воздуха и поверхности ограждающей конструкции на высоте 1,5 м от пола в помещении в период измерений 10.03.2022–11.03.2022:

- 1 – температура внутреннего воздуха (дата измерения: 11.03.2022);
- 2 – температура внутреннего воздуха (дата измерения: 10.03.2022);
- 3 – температура поверхности ограждающей конструкции (дата измерения: 11.03.2022);
- 4 – температура поверхности ограждающей конструкции на (дата измерения: 10.03.2022)

F i g. 7. Average hourly values of the temperature of the indoor air and the surface of the envelope at a height of 1.5 m from the floor in the room during the measurement period 03.10.2022–03.11.2022:

- 1 – the temperature of the indoor air (date of measurement: 03.11.2022);
- 2 – the temperature of the indoor air (date of measurement: 03.10.2022);
- 3 – the temperature of the surface of the envelope (date of measurement: 03.11.2022);
- 4 – surface temperature of the envelope at (measurement date: 03.10.2022)

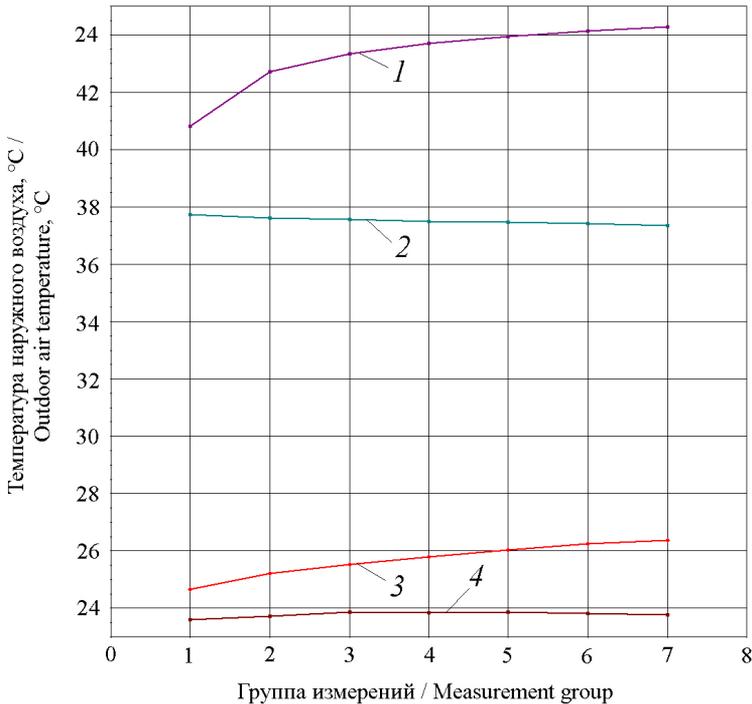


Р и с. 8. Среднечасовые значения температуры внутреннего воздуха и поверхности ограждающей конструкции на высоте 2,5 м от пола в помещении в период измерений 10.03.2022–11.03.2022:

- 1 – температура внутреннего воздуха (дата измерения: 11.03.2022);
- 2 – температура внутреннего воздуха (дата измерения: 10.03.2022);
- 3 – температура поверхности ограждающей конструкции (дата измерения: 11.03.2022);
- 4 – температура поверхности ограждающей конструкции (дата измерения: 10.03.2022)

Fig. 8. Average hourly values of the temperature of the indoor air and the surface of the envelope at a height of 2.5 m from the floor in the room during the measurement period 03.10.2022–03.11.2022:

- 1 – the temperature of the indoor air (date of measurement: 03.11.2022);
- 2 – the temperature of the indoor air (date of measurement: 03.10.2022);
- 3 – the temperature of the surface of the envelope (date measurements: 03.11.2022);
- 4 – surface temperature of the envelope (measurement date: 03.10.2022)



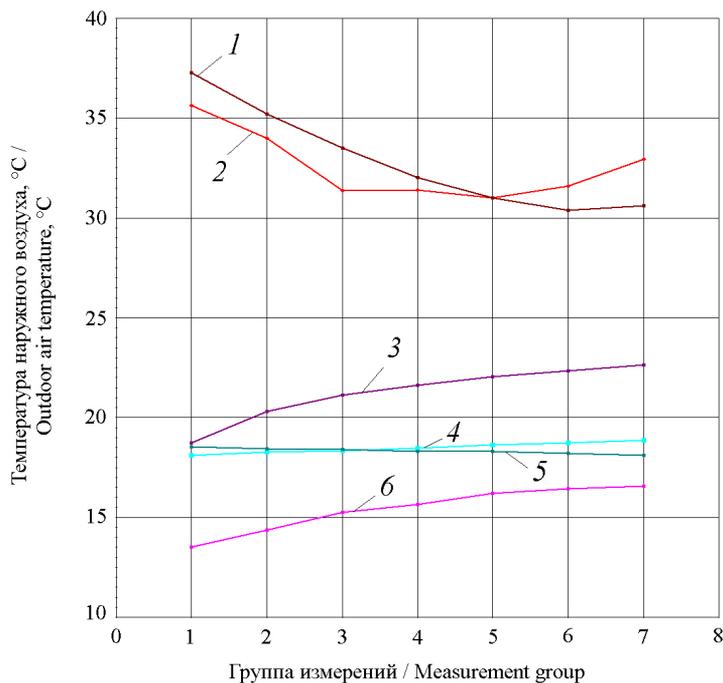
Р и с. 9. Среднечасовые значения температуры внутреннего воздуха и поверхности ограждающей конструкции за отопительным прибором в помещении в период измерений 10.03.2022–11.03.2022:

- 1 – температура поверхности ограждающей конструкции (дата измерения: 11.03.2022);
- 2 – температура поверхности ограждающей конструкции (дата измерения: 10.03.2022);
- 3 – температура внутреннего воздуха (дата измерения: 11.03.2022);
- 4 – температура внутреннего воздуха (дата измерения: 10.03.2022)

Fig. 9. Average hourly values of the temperature of the indoor air and the surface of the envelope behind the heating device in the room during the measurement period 03.10.2022–03.11.2022:

- 1 – the temperature of the surface of the envelope (date of measurement: 03.11.2022);
- 2 – surface temperature of the envelope (measurement date: 03.10.2022);
- 3 – the temperature of the indoor air (date of measurement: 03.11.2022);
- 4 – the temperature of the indoor air (date of measurement: 03.10.2022)

На рисунках 10–13 представлены средние значения разности температур внутреннего и наружного воздуха, температур на поверхности ограждающих конструкций и тепловой поток через ограждающие конструкции, измеренные в точках на уровне 0,5 м, 1,5 м, 2,5 м и за отопительным прибором в рассматриваемые выше период и даты.

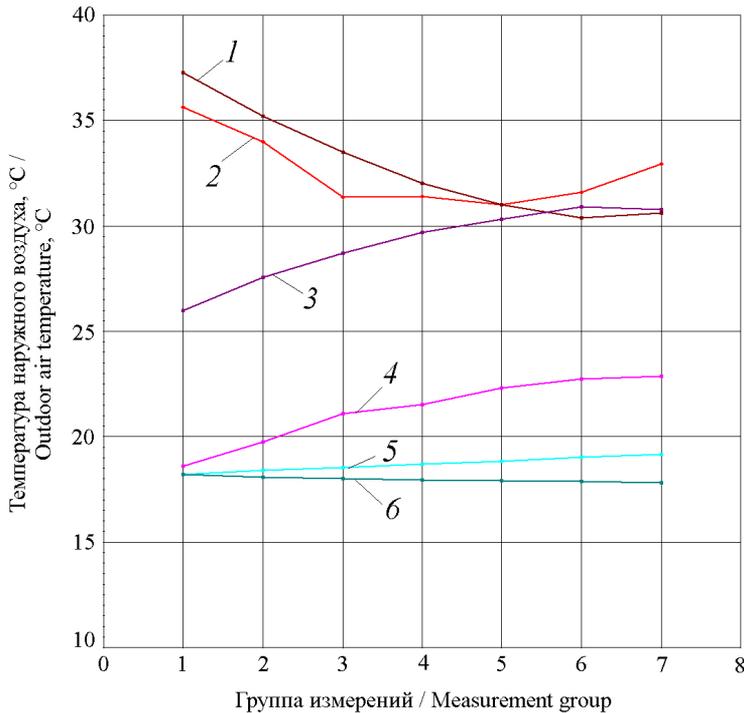


Р и с. 10. Разность температуры внутреннего и наружного воздуха, температура ограждающей конструкции и тепловой поток через ограждающие конструкции на высоте 0,5 м от пола в помещении в период измерений 10.03.2022–11.03.2022:

- 1 – разность температур внутреннего и наружного воздуха (дата измерения: 10.03.2022);
- 2 – разность температур внутреннего и наружного воздуха (дата измерения: 11.03.2022);
- 3 – тепловой поток через ограждающие конструкции (дата измерения: 11.03.2022);
- 4 – температура поверхности ограждающей конструкции (дата измерения: 11.03.2022);
- 5 – температура поверхности ограждающей конструкции (дата измерения: 10.03.2022);
- 6 – тепловой поток через ограждающие конструкции (дата измерения: 10.03.2022)

Fig. 10. The temperature difference between indoor and outdoor air, the temperature of the envelope and the heat flow through the envelope at a height of 0.5 m from the floor in the room during the measurement period 03.10.2022–03.11.2022:

- 1 – the temperature difference between indoor and outdoor air (measurement date: 03.10.2022);
- 2 – the temperature difference between indoor and outdoor air (measurement date: 03.11.2022);
- 3 – heat flow through the envelope (measurement date: 03.11.2022);
- 4 – surface temperature of the envelope (measurement date: 03.11.2022);
- 5 – surface temperature of the envelope (measurement date: 03.10.2022);
- 6 – heat flow through the envelope (measurement date: 03.10.2022)

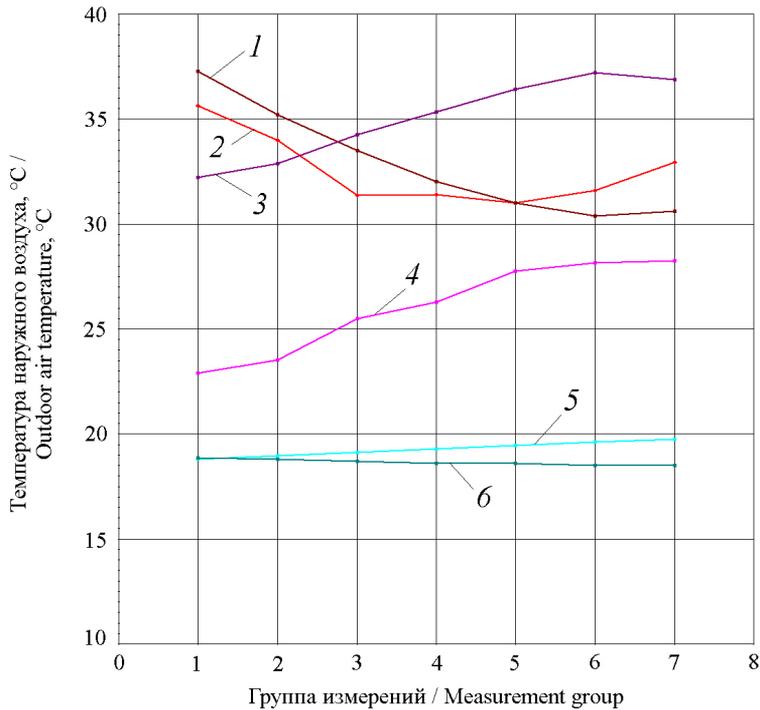


Р и с. 11. Разность температуры внутреннего и наружного воздуха, температура ограждающей конструкции и тепловой поток через ограждающие конструкции на высоте 1,5 м от пола в помещении в период измерений 10.03.2022–11.03.2022:

- 1 – разность температур внутреннего и наружного воздуха (дата измерения: 10.03.2022);
- 2 – разность температур внутреннего и наружного воздуха (дата измерения: 11.03.2022);
- 3 – тепловой поток через ограждающие конструкции (дата измерения: 11.03.2022);
- 4 – тепловой поток через ограждающие конструкции (дата измерения: 10.03.2022);
- 5 – температура поверхности ограждающей конструкции (дата измерения: 11.03.2022);
- 6 – температура поверхности ограждающей конструкции (дата измерения: 10.03.2022)

F i g. 11. The temperature difference between indoor and outdoor air, the temperature of the envelope and the heat flow through the envelope at a height of 1.5 m from the floor in the room during the measurement period 03.10.2022–03.11.2022:

- 1 – the temperature difference between indoor and outdoor air (measurement date: 03.10.2022);
- 2 – the temperature difference between indoor and outdoor air (measurement date: 03.11.2022);
- 3 – heat flow through the envelope (measurement date: 03.11.2022);
- 4 – heat flow through the envelope (measurement date: 03.10.2022);
- 5 – surface temperature of the envelope (measurement date: 03.11.2022);
- 6 – surface temperature of the envelope (measurement date: 03.10.2022)

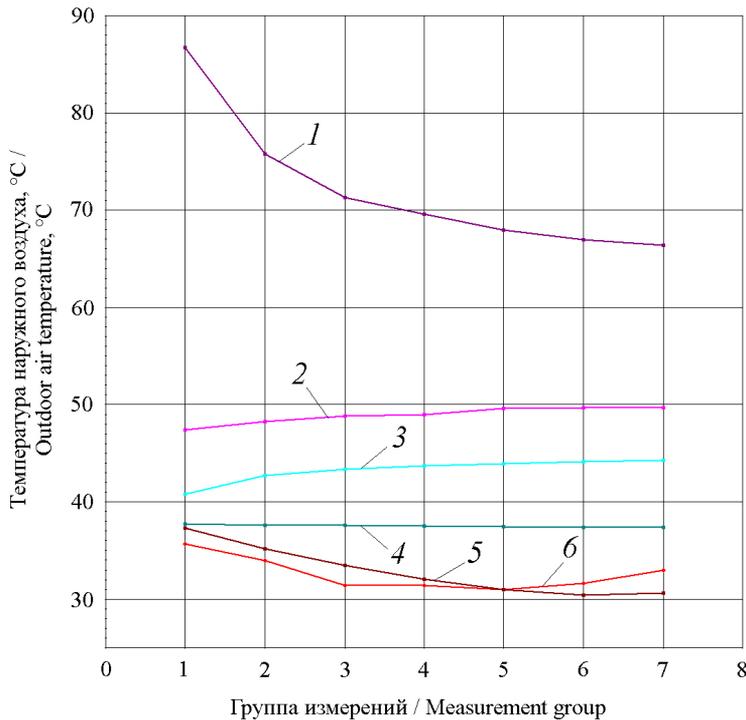


Р и с. 12. Разность температуры внутреннего и наружного воздуха, температура ограждающей конструкции и тепловой поток через ограждающие конструкции на высоте 2,5 м от пола в помещении в период измерений 10.03.2022–11.03.2022:

- 1 – разность температур внутреннего и наружного воздуха (дата измерения: 10.03.2022);
- 2 – разность температур внутреннего и наружного воздуха (дата измерения: 11.03.2022);
- 3 – тепловой поток через ограждающие конструкции (дата измерения: 11.03.2022);
- 4 – тепловой поток через ограждающие конструкции (дата измерения: 10.03.2022);
- 5 – температура поверхности ограждающей конструкции (дата измерения: 11.03.2022);
- 6 – температура поверхности ограждающей конструкции (дата измерения: 10.03.2022)

F i g. 12. The temperature difference between indoor and outdoor air, the temperature of the envelope and the heat flow through the envelope at a height of 2.5 m from the floor in the room during the measurement period 03.10.2022–03.11.2022:

- 1 – the temperature difference between indoor and outdoor air (measurement date: 03.10.2022);
- 2 – the temperature difference between indoor and outdoor air (measurement date: 03.11.2022);
- 3 – heat flow through the envelope (measurement date: 03.11.2022);
- 4 – heat flow through the envelope (measurement date: 03.10.2022);
- 5 – surface temperature of the envelope (measurement date: 03.11.2022);
- 6 – surface temperature of the envelope (measurement date: 03.10.2022)



Р и с. 13. Разность температуры внутреннего и наружного воздуха, температура поверхности ограждающей конструкции и тепловой поток через ограждающие конструкции за отопительным прибором в помещении в период измерений 10.03.2022–11.03.2022:

- 1 – тепловой поток через ограждающие конструкции (дата измерения: 11.03.2022);
- 2 – тепловой поток через ограждающие конструкции (дата измерения: 10.03.2022);
- 3 – температура поверхности ограждающей конструкции (дата измерения: 11.03.2022);
- 4 – температура поверхности ограждающей конструкции (дата измерения: 10.03.2022);
- 5 – разность температур внутреннего и наружного воздуха (дата измерения: 10.03.2022);
- 6 – разность температур внутреннего и наружного воздуха (дата измерения: 11.03.2022)

Fig. 13. The temperature difference between indoor and outdoor air, the surface temperature of the envelope and the heat flow through the enclosing structures behind the heating device in the room during the measurement period 03.10.2022–03.11.2022:

- 1 – heat flow through the envelope (measurement date: 03.11.2022);
- 2 – heat flow through the enclosing structures (measurement date: 03.10.2022);
- 3 – temperature surface of the envelope (date of measurement: 03.11.2022);
- 4 – surface temperature of the envelope (date of measurement: 03.10.2022);
- 5 – temperature difference between indoor and outdoor air (date of measurement: 03.10.2022);
- 6 – temperature difference between indoor and outdoor air (date of measurement: 03.11.2022)

Из приведенного графика следует, что температура внутреннего воздуха в помещении при неизменных в период измерения начальных (на начало измерений) настроек в управлении системы отопления и в теплогенераторе (на источнике тепловой энергии) как при традиционном способе подачи теплоносителя, так и при пульсации температуры теплоносителя в высокотемпературном контуре системы отопления растет с повышением температуры наружного воздуха.

Повышение температуры наружного воздуха приводит к снижению разности температур внутреннего и наружного воздуха: при традиционном способе

подачи теплоносителя (дата измерения 11.03.2022) разность температур снижалась с $+35,639$ °C до $+31,004$ °C с незначительным последующим ростом до $+32,947$ °C; при пульсации температуры теплоносителя в высокотемпературном контуре системы отопления разность температур внутреннего и наружного воздуха снижалась с $+37,271$ °C до $+30,370$ °C с последующим незначительным ростом до $+30,620$ °C. При этом температура на поверхности ограждающих конструкций здания возрастает при традиционном способе подачи теплоносителя и снижается при пульсации температуры теплоносителя в контурах системы отопления.

Получены зависимости теплового потока через ограждающие конструкции от уровня размещения зоны измерения над поверхностью пола. При пульсации температуры теплоносителя в контурах системы отопления за период измерения средние часовые значения теплового потока в зоне измерения 0,5 м от поверхности пола возрастали с $13,508$ Вт/м² до $16,56$ Вт/м²; при традиционном способе подачи – с $18,743$ Вт/м² до $22,625$ Вт/м². Для зоны измерения 1,5 м от поверхности пола соответственно возрастали с $18,59$ Вт/м² до $22,86$ Вт/м² при пульсации и с $25,993$ Вт/м² до $30,785$ Вт/м² при традиционном способе. Для зоны измерения 2,5 м от поверхности пола при пульсации – с $22,885$ Вт/м² до $28,26$ Вт/м²; при традиционном способе – с $32,237$ Вт/м² до $36,88$ Вт/м². Однако для зоны измерения за отопительным прибором средние часовые значения теплового потока при пульсации температуры повысились с $47,412$ Вт/м² до $49,643$ Вт/м², а при традиционном способе снижались с $86,761$ Вт/м² до $66,417$ Вт/м².

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные экспериментальные исследования позволяют оценить влияние повышения температуры наружного воздуха и организации пульсации температуры теплоносителя в системе отопления на разность температур внутреннего и наружного воздуха, плотность теплового потока через ограждающие конструкции для различных зон от уровня пола для здания индивидуальной постройки. Разность температур внутреннего и наружного воздуха с повышением температуры наружного воздуха снижается интенсивнее в режиме пульсации температуры теплоносителя в системе отопления по сравнению с традиционным способом подачи теплоносителя в контуры системы отопления. Что касается средних значений плотности теплового потока, то их превышение в зонах измерения температур поверхности ограждающих конструкций при традиционном способе подачи теплоносителя в контуры системы отопления над средними значениями плотности теплового потока при пульсации теплоносителя соответственно составляет: для зоны 0,5 м от пола – 37,83 %; для зоны 1,5 м от пола – 37,04 %; для зоны 2,5 м от пола – 34,49 %; для зоны за отопительным прибором – 47,42 %. Данные превышения являются обоснованным потенциалом снижения теплового потока, обусловленного созданием низкочастотной пульсации температуры теплоносителя в контурах системы отопления здания. Последующая адаптация данной технологии на трех общественных зданиях показала снижение теплопотребления по сравнению с традиционным режимом подачи теплоносителя от 20 % до 37 % и может быть рекомендована для различных групп зданий, в том числе и сельскохозяйственного назначения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимова Е.Ю. Энергоэффективность теплового режима здания при использовании оптимального режима прерывистого отопления. *Вестник ЮУрГУ*. 2012;38:55–59. URL: <https://vestnik.susu.ru/building/article/view/525> (дата обращения: 13.04.2025).
2. Дегтярь А.Б., Панферов В.И. Построение алгоритма импульсного отопления здания и исследование режимов его работы. *Вестник ЮУрГУ*. 2008;(17):41–44. <https://www.elibrary.ru/jtwkvd>
3. Мишин М.А. Исследование процессов остывания теплоносителя при прерывистом регулировании отопления. *Ползуновский Вестник*. 2010;(1):146–152. URL: http://elib.altstu.ru/journals/Files/pv2010_01/index.htm (дата обращения: 15.04.2025).
4. Левцев А.П., Ениватов А.В., Артемов И.Н. Устройство для управления теплотреблением в системе отопления здания и способ организации его работы. Патент 2797616 Российская Федерация. 7 июня 2023. URL: <https://www.fips.ru/cdfi/fips.dll/ru?ty=29&docid=2841346> (дата обращения: 21.04.2025).
5. Прохоренко А.М., Качала Н.М. Оптимизация режимов работы систем теплоснабжения объектов коммунальной энергетики методами ситуационного управления. *Фундаментальные исследования*. 2012;(9):672–677. URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=30331> (дата обращения: 21.04.2025).
6. Ротов П.В., Орлов М.Е., Шарапов В.И. О температурном графике центрального регулирования систем теплоснабжения. *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2014;(5-6):3–12. <https://elibrary.ru/shlanf>
7. Лапин В.М. Энергоэффективность отопительных приборов с различной тепловой инерцией на прерывистых режимах отопления. *Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная физика*. 2012;(8):48–51. URL: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=5399 (дата обращения: 24.04.2025).
8. Табунщиков Ю.А., Бродач М.М. Экспериментальные исследования оптимального управления расходом энергии. *Academia. Архитектура и строительство*. 2006;(1):32–36. <https://elibrary.ru/mtpdsr>
9. Ливчак В.И., Чугункин А.А., Оленев В.А. Энергоэффективность пофасадного автоматического регулирования систем отопления. *Водоснабжение и санитарная техника*. 1986;(5).
10. Панферов В.И., Панферов В.И. Автоматическое управление системами отопления с элеваторным присоединением. *Вестник ЮУрГУ*. 2013;13(1):42–47. URL: <https://vestnik.susu.ru/ctcr/article/view/189> (дата обращения: 24.04.2025).
11. Малявина Е.Г. Асатов Р.Р. Влияние теплового режима наружных ограждающих конструкций на нагрузку системы отопления при прерывистой подаче теплоты. *Academia. Архитектура и строительство*. 2010;(3):324–327. <https://elibrary.ru/ntlbwx>
12. Наумов А.Л., Агафонова И.А., Иванихина Л.В. Инженерные системы энергоэффективного жилого дома. *Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная физика*. 2003;(8):6–11. URL: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=2251 (дата обращения: 25.04.2025).
13. Абдуллин В.В. Модельно-упреждающее управление тепловым режимом здания. *Вестник ЮУрГУ*. 2015;15(3):33–39. URL: <https://vestnik.susu.ru/ctcr/article/view/4206> (дата обращения: 04.05.2025).
14. Ениватов А.В., Артемов И.И., Неясов А.С. Микроканальная отопительная панель в низкотемпературном контуре системы отопления. *Инновации и инвестиции*. 2022;(9):157–161. URL: <https://www.innovazia.ru/archive/36112/> (дата обращения: 04.05.2025).
15. Левцев А.П., Ениватов А.В., Артемов И.Н. Устройство для управления теплотреблением в системе отопления здания. Патент 2841346 Российская Федерация. 6 июня 2025. <https://www.elibrary.ru/hyjkxa>

16. Ерофеев В.Т., Ельчищева Т.Ф., Левцев А.П., Митина Е.А., Лапин Е.С. Термическое сопротивление наружных ограждающих конструкций при переменном тепловом потоке. *Промышленное и гражданское строительство*. 2022;(10):4–13. <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2022.10.04-13>
17. Гагарин В.Г., Козлов В.В. Теоретические предпосылки расчета приведенного сопротивления ограждающих конструкций. *Строительные материалы*. 2010;(12):4–12. <https://elibrary.ru/nqtzmt>

REFERENCES

1. Anisimova E.Y. Energy Efficiency of Temperature Conditions for a Building at Optimum Intermittent Central Heating Use. *Bulletin of SUSU*. 2012;38:55–59. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://vestnik.susu.ru/building/article/view/525> (accessed 13.04.2025).
2. Degtyar A.B., Panferov V.I. Projection of Algorithm of Pulsed Building Heating and Research of the Modes of its Work. *Bulletin of SUSU*. 2008;(17):41–44. (In Russ., abstract in Eng.) <https://www.elibrary.ru/jtwkvd>
3. Mishin M.A. [Investigation of Coolant Cooling Processes During Intermittent Heating Regulation] *Polzunovskiy Vestnik*. 2010;(1):146–152. (In Russ.) Available at: http://elib.altstu.ru/journals/Files/pv2010_01/index.htm (accessed 15.04.2025).
4. Levitsev A.P., Enivatov A.V., Artemov I.N. Device for Controlling Heat Consumption in Building Heating System and Method for Organizing Operation Thereof. Patent 2797616 Russian Federation. 2023 June 7. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://www.fips.ru/cdfi/fips.dll/ru?ty=29&docid=2841346> (accessed 21.04.2025).
5. Prokhorenko A.M., Kachala N.M. Optimization of Operation Regimes in Heat Supply Systems of Municipal Power Objects by Situational Control Methods. *Fundamental Research*. 2012;(9):672–677. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://fundamental-research.ru/en/article/view?id=30331> (accessed 21.04.2025).
6. Rotov P.V., Orlov M.E., Sharapov V.I. About the Temperature Schedule of the Central Regulation of Systems of the Heat Supply. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. 2014;(5-6):3–12. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/shlanf>
7. Lapin V.M. Energy Efficiency of Heating Appliances with Various Thermal Inertia During Intermittent Heating Modes. *ABOK*. 2012;(8):48–51. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=5399 (accessed 24.04.2025).
8. Tabunshchikov Yu.A., Brodach M.M. [Experimental Studies of Optimal Control of Energy Consumption]. *Academia. Architecture and Construction*. 2006;(1):32–36. (In Russ.) <https://elibrary.ru/mtpdsr>
9. Livchak V.I., Chugunkin A.A., Olenev V.A. [Energy Efficiency of Façade Automatic Control of Heating Systems]. *Water Supply and Sanitary Technique*. 1986;(5). (In Russ.).
10. Panferov S.V., Panferov V.I. Automatic Control for Heating Systems with Water Jet Pump Accession. *Bulletin of SUSU*. 2013;13(1):42–47. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://vestnik.susu.ru/ctcr/article/view/189> (accessed 24.04.2025).
11. Malyavina E.G. Asatov R.R. Influence of the External Enclosing Structure Heat Mode on the Heating System Load Under the Interruptive Heat Supply. *Academia. Architecture and Construction*. 2010;(3):324–327. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/ntlbwX>
12. Naumov A.L., Agafonova I.A., Ivanikhina L.V. [Engineering Systems for an Energy-Efficient Residential Building]. *ABOK*. 2003;(8):6–11. (In Russ.) Available at: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=2251 (accessed 25.04.2025).
13. Abdullin V.V. Building Thermal Performance Feed-Forward Control. *Bulletin of SUSU*. 2015;15(3):33–39. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://vestnik.susu.ru/ctcr/article/view/4206> (accessed 04.05.2025).

14. Enivatov A.V., Artemov I.I., Neyasov A.S. Microduct Heating Panel in the Low-Temperature Circuit of the Heating System. *Innovation & Investment*. 2022;(9):157–161. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://www.innovazia.ru/archive/36112/> (accessed 04.05.2025).
15. Levitsev A.P., Enivatov A.V., Artemov I.N. Device For Controlling Heat Consumption In Building Heating System and Method for Organizing Operation Thereof. Patent 2841346 Russian Federation. 2025 June 6. (In Russ., abstract in Eng.) <https://www.elibrary.ru/hyjkxa>
16. Erofeev V.T., Yelchishcheva T.F., Levitsev A.P., Mitina E.A., Lapin E.S. Thermal Resistance of External Enclosing Structures at Variable Heat Flow. *Industrial and Civil Engineering*. 2022;(10):4–13. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2022.10.04-13>
17. Gagarin V.G., Kozlov V.V. [Theoretical Prerequisites for Calculating the Reduced Resistance of Enclosing Structures]. *Construction Materials*. 2010;(12):4–12. (In Russ.) <https://elibrary.ru/nqztmt>

Об авторах:

Левцев Алексей Павлович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теплоэнергетических систем Института механики и энергетики Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2429-6777>, Researcher ID: B-8620-2019, levtzevap@mail.ru

Ениватов Александр Васильевич, старший преподаватель кафедры теплоэнергетических систем Института механики и энергетики Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9385-8466>, enivatovav@mail.ru

Вклад авторов:

А. П. Левцев – постановка задач, форма представления данных и его анализ, доработка текста.

А. В. Ениватов – подготовка текста с последующей доработкой, анализ литературных данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 13.01.2026; поступила после рецензирования 26.01.2026;
принята к публикации 04.02.2026*

About the authors:

Aleksei P. Levitsev, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Heat Power Systems at the Institute of Mechanics and Energy, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2429-6777>, Researcher ID: B-8620-2019, levtzevap@mail.ru

Alexander V. Enivatov, Senior Lecturer at the Department of Heat Power Engineering at the Institute of Mechanics and Energy, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9385-8466>, enivatovav@mail.ru

Authors contribution:

A. P. Levitsev – formulating the study objectives; collecting, analyzing and presenting the study data; revising of the manuscript text.

A. V. Enivatov – preparing the manuscript with subsequent revision; analyzing literary data.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 13.01.2026; revised 26.01.2026; accepted 04.02.2026

МАШИНОСТРОЕНИЕ / MECHANICAL ENGINEERING



<https://doi.org/10.15507/2658-4123.036.202601.183-203>

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

УДК / UDK 631.3-049.7

Оригинальная статья / Original article

Управление жесткостью конструкции сельскохозяйственной техники в процессе ее эксплуатации

М. В. Астахов, Е. В. Славкина 

*Московский государственный технический
университет имени Н. Э. Баумана,*

г. Москва, Российская Федерация, <https://ror.org/00pb8h375>

 *slavkina@bmstu.ru*

Аннотация

Введение. Одним из перспективных подходов в проектировании конструкций машин является разработка адаптивных конструкций, компенсирующих внешние воздействия путем изменения напряженно-деформированного состояния своих элементов. Однако в сельскохозяйственной технике такие конструкции пока не получили широкого применения, что связано с характером нагружения и спецификой перевозимых грузов, вызывающих интенсивную коррозию и абразивный износ.

Цель исследования. Анализ способов изменения прочностных характеристик конструкций деталей и узлов сельскохозяйственных машин в процессе их эксплуатации и разработка методов определения их напряженно-деформированного состояния для использования в алгоритме управления проектированием.

Материалы и методы. Рассмотрен борт кузова транспортного средства, в котором несущая силовая часть выполнена в виде многослойной прямоугольной пластинки из полимерного композитного материала. Внутренние слои пластинки представляют собой соты, заполненные неньютоновской дилатантной жидкостью. Применены методы математического моделирования на основе построения краевых задач статики многослойных тонких пластинок, а также пластинок на упругом основании и исследования их напряженно-деформированного состояния путем аналитического решения дифференциальных уравнений, выраженных в перемещениях.

Результаты исследования. Разработан алгоритм определения напряженно-деформированного состояния многослойной прямоугольной пластинки из композитного материала с дискретным опиранием, находящейся под действием нормальной распределенной нагрузки, с учетом ударных возмущающих факторов. Найдены максимальные изгибные напряжения, а также напряжения, возникающие от торможения внутренней частью борта твердого тела, движущегося с ускорением.

Обсуждение и заключение. Проведенное исследование позволило проанализировать существующие конструкционные материалы, технологии и технические средства, используемые для компенсации управляющих воздействий, возникающих при работе машин. Разработана методология перехода от традиционных конструкций к перспективным моделям, имеющим адаптивные элементы, способные менять свое

© Астахов М. В., Славкина Е. В., 2026



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

напряженно-деформированное состояние в зависимости от изменения внешней нагрузки. Теоретически обоснованная многослойная композитная конструкция борта кузова транспортного средства способна выдерживать не только распределенные силы, но и удары, при этом ее материалоемкость значительно снижена (в несколько раз) по сравнению со стальной, а ресурс увеличен в связи с химической стойкостью материалов, применяемых при ее изготовлении. Подобный подход в проектировании позволяет использовать предлагаемую методологию для реализации широкого круга задач по выпуску новой техники сельскохозяйственной отрасли.

Ключевые слова: борт прицепа транспортного средства, полимерный композитный материал, многослойная композитная пластинка, адаптивная конструкция, алгоритм управления

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Астахов М.В., Славкина Е.В. Управление жесткостью конструкции сельскохозяйственной техники в процессе ее эксплуатации. *Инженерные технологии и системы.* 2026;36(1):183–203. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.036.202601.183-203>

Control of the Structural Rigidity of Agricultural Machinery During its Operation

M. V. Astakhov, E. V. Slavkina 

*Bauman Moscow State Technical University,
Moscow, Russian Federation, <https://ror.org/00pb8h375>*

 *slavkina@bmmstu.ru*

Abstract

Introduction. A promising approach to the machine design is the development of adaptive design structures compensating for external influences by changing the stress-strain state of their elements. However, these structures have not been widely used in agricultural machinery design because of the type of loading and the specific of transported loads that cause intense corrosion and abrasive damage.

Aim of the study. The study is aimed at analyzing the methods for changing the strength characteristics of the structures of parts and assembly units of agricultural machinery during their operation and at developing methods for determining their stress-strain state to use in the design control algorithm.

Materials and methods. As an example, we have examined the side of a vehicle body. Based on the principles of automatic control theory, the load-carrying structure is designed as a multilayer rectangular plate made of a polymer composite material. The inner layers are honeycomb filled with a non-Newtonian dilatant fluid. The filler performs the function of a compensator for external impacts. There were used the methods of mathematical modeling based on the constructing boundary value problems of the statics of multilayer thin plates, and plates on an elastic foundation, and studying their stress-strain state by solving analytically differential equations expressed in displacements.

Results. There was developed an algorithm for determining the stress-strain state of a multilayer rectangular composite plate with discrete support under a normal distributed load taking into account impact disturbances. There were determined maximum bending stresses and the stresses arising from the braking of a rigid body moving with acceleration by the inner part of the plate.

Discussion and Conclusion. In the study, there have been analyzed existing structural materials, technologies and technical means used to compensate for control action arising from the machine operation. There has been developed the methodology for transitioning from traditional designs to advanced models featuring adaptive elements, which change their stress-strain state depending on changes in external load. There has been theoretically substantiated a multilayer composite vehicle body side structure, which can

withstand not only distributed forces but also impacts. Its material consumption is significantly reduced (several times) compared to steel, and its service life is increased due to the chemical resistance of the materials used in its manufacture. This design approach allows the proposed methodology to be used for a wide range of applications in the production of new agricultural equipment.

Keywords: vehicle trailer side, polymer composite material, multilayer composite plate, adaptive design, control algorithm

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

For citation: Astakhov M.V., Slavkina E.V. Control of the Structural Rigidity of Agricultural Machinery During its Operation. *Engineering Technologies and Systems*. 2026;36(1):183–203. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.036.202601.183-203>

ВВЕДЕНИЕ

Адаптивные конструкции представляют собой передовое решение в инженерии, которое находит применение в различных сферах, включая машиностроение, строительство, а также другие промышленные отрасли.

Одним из главных преимуществ таких конструкций является возможность получения качественно новых характеристик: такие конструкции могут обеспечивать более высокую прочность, жесткость и устойчивость к внешним воздействиям по сравнению с традиционными. Кроме того, адаптивные конструкции позволяют снизить материалоемкость за счет рационального распределения нагрузки и оптимизации формы изделий.

В настоящее время активно обсуждаются вопросы использования адаптивных конструкций в качестве некоторых агрегатов и узлов машин, способных изменять свои свойства в ответ на внешние воздействия, в том числе аварийные или экстремальные. Разработка таких систем способствует достижению качественно новых параметров путем рационального изменения напряженно-деформированного состояния входящих деталей. При этом снижается материалоемкость конструкции при сохранении уровня рабочих параметров. Достигается повышение надежности и эффективности за счет продления срока службы машины.

Адаптивность узлов и агрегатов машин можно рассматривать как способность автоматического управления жесткостью или физико-механическими свойствами материала входящих деталей в зависимости от изменения внешних возмущающих факторов: внешних сил, температуры окружающей среды и др. Во многих случаях такое управление осуществляется с помощью управляющих устройств, встроенных дополнительными звеньями в основные механизмы машины.

Различного вида механические управляющие устройства достаточно часто используются в технических решениях, но малоприменимы для аграрной техники. Специфика нагрузок, возникающих при эксплуатации сельскохозяйственных машин, характеризуется малоцикловыми воздействиями с высокой амплитудой или случайными локальными нагружениями (например, ударами). Это также объясняется некоторой задержкой реакции адаптивных устройств на внешние воздействия. Кроме того, такие системы, включенные в структуру сельскохозяйственной машины, приводят к усложнению ее конструкции, что уменьшает уровень надежности.

Регулярный рост цен на стальные полуфабрикаты является серьезной проблемой, поскольку увеличивает стоимость машин и, как следствие, продуктов сельского хозяйства, что стимулирует расширение ассортимента используемых конструкционных материалов в отрасли. Наиболее четко это может проявляться при производстве транспортирующих машин, где особенности воздействия перевозимых сельскохозяйственных грузов вызывают значительный коррозионный и абразивный износ, приводящий к сокращению срока службы оборудования.

Поэтому целью данного исследования является анализ возможных способов управления физико-механическими свойствами материалов, из которых изготавливаются детали, узлы и агрегаты сельскохозяйственных машин по перевозке грузов (на примере борта прицепа транспортного средства), и разработка методов определения напряженно-деформированного состояния для их включения в алгоритм управления проектированием, на основе чего должен выдерживаться алгоритм функционирования рассматриваемой системы во время эксплуатации.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Процесс проектирования конструкции машины, как и любой другой процесс изменения некоторых параметров во времени, можно описать на основе понятий теории автоматического управления¹.

В этом случае создание проекта, а затем объекта (машины) следует представить в виде информационно-математической модели (системы), алгоритм функционирования которой должен подчиняться известным принципам теории автоматического управления: принципу разомкнутого управления, принципу обратной связи или принципу компенсации (управлению по возмущению).

Применение первых двух принципов в неявном виде при проектировании машин широко распространено. Так, принцип разомкнутого управления используется всегда (часто в расчетах первого приближения), когда нужно получить оценочный результат при известных ограничениях. Принцип обратной связи применяется при создании сложных конструкций, для которых необходимо изготовление моделей или опытных изделий с целью проведения соответствующих испытаний с дальнейшей корректировкой управляющих воздействий.

Принцип компенсации, также известный как управление по возмущению, основывается на том, что изменения регулируемой величины, например внутренних сил, определяются как управляющими факторами (физические и геометрические характеристики системы), так и внешними воздействиями (внешние силы), т. е. предполагает корректировку параметров управляющих и возмущающих воздействий с целью получения управляемых координат процесса проектирования. При создании машин и сооружений принцип компенсации применяется не часто, так как предполагает работу не только с информационно-математической моделью (в виде проекта и конструкторской документации), но и с вновь изготовленной и эксплуатирующейся конструкцией.

¹ Астахов М.В. Управление проектированием. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана; 2011. 360 с.

Этот принцип использован при проектировании машин² с так называемыми следящими или управляемыми затяжками, которые автоматически изменяют напряженно-деформированное состояние создаваемой модели в зависимости от переменной во времени внешней нагрузки, т. е. изменение управляющих и возмущающих воздействий происходит только за счет построения новой структурной формулы машины³, что косвенно влияет на жесткость ее элементов.

Статические затяжки корректируют поле внутренних сил конструкции⁴ и при циклическом нагружении не меняют амплитуду цикла напряжений, вследствие чего увеличивают надежность в малой степени. Управляемые затяжки значительно уменьшают амплитуду цикла напряжений, но имеют свой недостаток – сложную конструкцию, что также сказывается на надежности системы.

Так, например, управляющее устройство автоматической компенсации окружных напряжений в емкости автотормовоза АСП-25 имеет 22 новые детали, а устройство компенсации меридиональных напряжений – 48. Автоматическое устройство компенсации сжимающих напряжений лонжерона рамы прицепа ПСЕ-20 состоит из 16 деталей⁵.

Если ввести в процесс компенсации управляющие воздействия, изменяющиеся во времени, в частности переменные во времени, физико-механические характеристики материала конструкции машины, функционально связанные с параметрами внешних сил, то можно отказаться от конструктивно сложных управляемых затяжек и проектировать системы, имеющие переменную во времени жесткость. Это открывает перспективы резкого снижения массы изделия, так как управление жесткостью предполагает управление не геометрическими, а физико-механическими параметрами материала входящих деталей проектируемой конструкции [1; 2].

Наличие механической или электронной подсистемы, следящей за изменением возмущающих факторов в конструкции, приводит к усложнению последней. Поэтому за счет управления физико-механическими параметрами материала следует так компенсировать воздействие переменных внешних сил, чтобы в алгоритме функционирования их можно было представить в виде некоторой постоянной величины.

В изделиях из изотропных материалов реализация данного подхода может быть затруднена. Чтобы уменьшить массу таких конструкций следует заменить традиционные металлические элементы на узлы и детали, сделанные из полимерных композитных материалов (ПКМ) [3; 4], в некоторых из которых могут быть предусмотрены элементы, меняющие свои физико-механические характеристики в зависимости от изменения внешних сил.

Одним из таких элементов может служить слой дилатантной жидкости, в частности, полисиликона. При воздействии на него твердым телом, движущимся с ускорением (удар), жидкий слой полисиликона становится упругим. В настоящее

² Астахов М.В. Управление проектированием.

³ Тимофеев Г.А. Теория механизмов и машин: учебник и практикум для вузов. М.: Юрайт; 2024. 432 с.

⁴ Беленя Е.И., Стрелецкий Н.С., Ведеников Г.С. Металлические конструкции. Специальный курс: учеб. пособие для вузов. М: Стройиздат; 1982. 472 с.

⁵ Астахов М.В. Управление проектированием.

время рассмотрена прямоугольная многослойная пластинка, одним из слоев которой являлся полисиликон [1]. В ходе экспериментов, на основе известных методик, были выявлены определенные механические свойства твердого полисиликона, проявляющиеся при ударе: модуль упругости первого рода, модуль сдвига, коэффициент Пуассона, плотность, изменение объема при изменении температуры окружающей среды [3; 5]. Также было исследовано поведение трехслойной пластинки из ПКМ при линейном увеличении значения загрузки и в течение ударного воздействия.

В результате изучения научных работ по применению полимерных композитных материалов в технических решениях, в частности исследований зарубежных ученых, были разработаны рекомендации для изготовления борта транспортного средства (ТС) из многослойных стеклокомпозитов, включающих в себя дилатантную жидкость [6–8].

Отечественными учеными исследована экономическая эффективность изготовления и эксплуатации композитного борта путем экспертных оценок технологии его изготовления, эксплуатации и утилизации. Сделан вывод о предпочтительности композитного борта перед стальным [9]. Подробно рассмотрены вопросы технологии ремонта аналогичных композитных изделий⁶, изучены процессы и установки, предназначенные для утилизации трехслойных композитных бортов⁷.

Необходимость снижения массы деталей и узлов сельскохозяйственных машин при одновременном увеличении их ресурса неоспорима. На основе анализа литературы можно определить направление исследований в виде построения методологии замены прототипа, стального узла машины, на узел, выполненный из композитных материалов на основе стекловолокна и полимерных смол с включением элементов, меняющих свои физико-механические характеристики в зависимости от изменения внешней нагрузки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объекты исследования

В качестве объекта исследования рассматривается процедура замены металлических (в частности, стальных) конструкций машин (на примере борта кузова ТС) композитными, выполненными на основе полимерных смол и различного вида волокон, тканей, рогож и другого вида наполнителей с элементами, меняющими свои физико-механические характеристики при резком изменении внешней нагрузки.

Материалы, методы, оборудование и процедура исследования

Рассматривая проблему замены борта ТС, выполненного из стальных деталей, на композитный борт, металлические детали в котором занимают не более 5 % объема изделия, разделили ее на ряд задач, без решения которых эффективной замены стали на композит невозможно [10].

Изготовление трехслойной или многослойной прямоугольной пластинки из полимерного композитного материала, внутренние слои которой представляют

⁶ Серегин Д.В. Повышение долговечности и эффективности использования дорожно-строительных машин за счет применения полимерных композиционных материалов: дис. ... канд. техн. наук. М.; 2020. 149 с.

⁷ Славкина Е.В. Конструирование силовых корпусных элементов транспортного средства сельскохозяйственного назначения из композитных материалов: дисс. ... канд. тех. наук. Курск; 2023. 179 с.

собой соты, гофр, армированный или неармированный пенопласт, не представляет технологической сложности (начиная с мокрой выкладки и заканчивая автоматической намоткой препрега на оправку)⁸ [11].

Металлические, чаще всего стальные, детали, предназначенные для компенсации или перераспределения сосредоточенных внешних сил, могут быть соединены с композитной частью конструкции различными известными разъемными или неразъемными соединениями. Одними из наилучших являются трансверсальные металло-композитные соединения, крепежный элемент которых имеет вид наконечника копья⁹. С помощью таких соединений можно изготавливать входящие стальные детали для борта, в частности петли крепления борта к платформе ТС и кронштейны его крепления к соседним бортам.

Такая замена серийного борта, изготовленного из рифтованного стального листа с рамным подкреплением на основе гнутых профилей, подробно рассмотрена на примере прицепа ПСЕ-20¹⁰. Стальной борт имел массу 120 кг. Опытный борт, выполненный в виде трехслойной пластинки – сэндвича с внутренним слоем из полистирольного пенопласта и наружными слоями из композита, изготовленного на основе полимеризации стеклоткани, предварительно пропитанной эпоксидной смолой с отвердителями и пластификаторами, имел массу 35 кг. Статические и полевые испытания показали – борт из ПКМ равнопрочен стальному, но имеет меньшую жесткость, что не повлияло на его эксплуатационные характеристики.

Единственным недостатком такого борта являлась низкая стойкость к ударным воздействиям при загрузке и перевозке твердокускового груза, хотя для ПСЕ-20 в технических условиях по эксплуатации характеристики груза были четко ограничены перевозкой только сыпучего и полужидкого груза.

Одним из вариантов увеличения стойкости борта к ударным воздействиям может служить его покрытие стальным листом, что является арьергардным решением.

Предложено в многослойном борте из ПКМ один слой выполнить из неньютоновской дилатантной жидкости (полисиликона), которая во время удара о борт твердым телом приобретала в месте удара упругие свойства [8] (рис. 1, 2).

Разъемные резьбовые соединения показаны условно на рисунке 1 (деталь 1) в форме четырех шестигранных головок, закрепленных на теле шпилек, внедренных в тело препрега при мокрой выкладке без перерезания нитей основы. На серийном экземпляре борта вместо гаек должны быть установлены чечевицеобразные головки, утопленные в тело стального кронштейна А.

Исходя из полученных механических характеристик полисиликона в упругом состоянии [3] и методик расчета многослойных пластинок, выполненных из ПКМ¹¹ [12], был составлен алгоритм управления проектированием борта транспортного средства¹² [13], на основе чего должен выдерживаться алгоритм

⁸ Справочник по композиционным материалам: под ред. Любина Дж. М.: Машиностроение; 1988. 448 с.

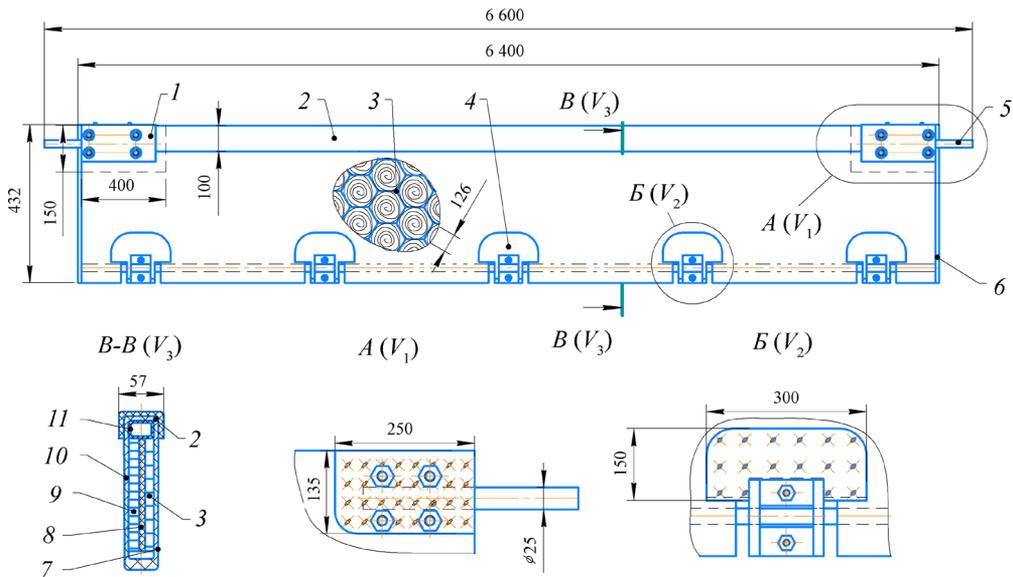
⁹ Астахов М.В., Сорокина И.И. Проектирование трансверсальных металло-композитных соединений. Маврикий: LAP LAMBERT Academic Publishing; 2017. 233 с.

¹⁰ Астахов М.В. Управление проектированием.

¹¹ Александров А.Я., Брюккер Л.Э., Куршин Л.М., Прусаков А.П. Расчет трехслойных панелей. М.: Оборонгиз; 1960. 271 с.

¹² Славкина Е.В. Конструирование силовых корпусных элементов транспортного средства сельскохозяйственного назначения из композитных материалов.

функционирования системы во время эксплуатации, опирающийся на третий принцип теории автоматического управления – принцип компенсации. В процессе эксплуатации борта ТС при ударе его управляющие воздействия (физико-механические характеристики материала) изменяются, на «затвердевание» дилатантной жидкости затрачивается часть энергии удара, т. е. внутренние силы в этой зоне уменьшаются. В результате возникновения длинных молекул в полисиликоне [14] создается упругая пластинка, опирающаяся на упругое основание композитной перегородки борта 4 (рис. 2), что меняет структурную формулу системы. Это, в свою очередь, приводит к дальнейшему перераспределению внутренних сил и уменьшению их концентрации в месте удара.



Р и с. 1. Борт ТС из ПКМ:

- 1, 5 – стальные кронштейны, примыкающие к торцевым бортам платформы ТС;
 2 – продольный силовой профиль из ПКМ; 3 – соты, предназначенные для создания замкнутого объема, в котором происходит затвердевание полисиликона при ударе; 4 – стальные петли для открытия борта; 6 – левая и правая торцевые крышки борта; 7 – внутренняя пластина борта, контактирующая с перевозимым грузом; 8 – внутренняя силовая пластина из ПКМ;
 9 – соты из ПКМ; 10 – наружная пластина борта, выполненная из ПКМ;
 11 – внутренний, круглой или овальной формы, стальной профиль усиления верхней части борта

F i g. 1. Vehicle side made of polymer composite materials:

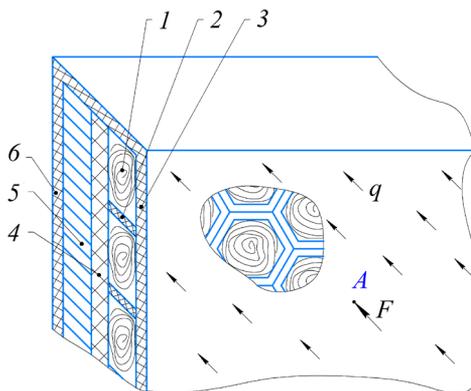
- 1, 5 – steel brackets adjacent to the end sides of the vehicle platform; 2 – longitudinal power profile made of PCM; 3 – honeycombs designed to create a closed volume in which the polysilicon hardens upon impact; 4 – steel hinges for opening the side; 6 – left and right end covers of the side; 7 – inner side plate in contact with the transported cargo; 8 – inner power plate made of PCM;
 9 – PCM honeycombs; 10 – outer side plate made of PCM;
 11 – internal, round or oval, steel profile for reinforcing the upper part of the side

Примечание: А – узел; В – узел; В-В – сечение.

Note: V_1 – assembly unit; V_2 – assembly unit; V_3 – section.

Источник: рисунки 1–5 составлены авторами статьи.

Source: the figures 1–5 are compiled by the authors of the article.



Р и с. 2. Левый угол борта ТС (входящие детали 1, 9, 11 борта на рис. 1 здесь не показаны):

- 1 – полисиликон, заключенный в пленку из полиэтилена;
 2 – соты из ПКМ для полисиликона; 3 – внутренняя пластина; 4 – внутренняя силовая пластина;
 5 – силовые соты из ПКМ; 6 – наружная пластина

F i g. 2. Left vehicle side corner (inputs 1, 9, 11 not shown):

- 1 – polysilicone enclosed in a polyethylene film; 2 – polyethylene composite honeycomb
 for polysilicone; 3 – inner plate; 4 – inner force plate;
 5 – polyethylene composite force honeycomb; 6 – outer plate

Примечание: q – распределенная сила от перевозимого груза; F – ударная нагрузка.

Note: q – distributed force from the transported load; F – shock load.

Было выяснено, что механические характеристики твердого полисиликона близки к механическим характеристикам резины с наполнителем – сажей [3]. Однако необходимо учитывать, что любой элемент системы «Борт транспортного средства» может воспринимать внешние нагрузки и перераспределять внутренние силы, будучи замкнут на соседние элементы путем опирания, либо свободного, либо в виде шарнира или защемления [9].

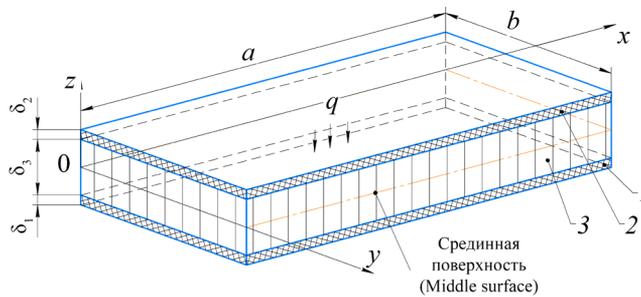
Возникновение упругой пластинки из полисиликона в крупных шестигранных сотах при ударе предполагало аппроксимацию опирания вдоль шестигранного контура сот из ПКМ в виде квазицилиндрического шарнира. В результате, изгибающий момент по контуру упругой пластинки был равен нулю, а распределенная продольная реактивная сила, параллельная срединной поверхности внутреннего листа борта, передавалась через стенки сот в соседние ячейки, заполненные полисиликоном, который частично «затвердевал» и поглощал остаточную энергию удара.

В случае резиновой прокладки на ее краях необходимо создание реального шарнирного опирания (из какого-либо металла), что значительно утяжелило бы и усложнило конструкцию, и одна из целей – снижение массы борта – не была бы достигнута.

Следует заметить, что воспринимающими основную часть внешней нагрузки, являются слои 4, 5, 6 (рис. 2). Слой 6 контактировал с перевозимым грузом, поэтому во избежание абразивного изнашивания его необходимо было покрыть эпоксидным гелькоутом с упрочняющей добавкой в виде наполнителя – нанокристаллического порошка корунда (Al_2O_3) [15; 16]. Это, согласно проведенным

исследованиям [15; 17–19], позволило повысить микротвердость и износостойкость, а также препятствовать отслаиванию стеклоткани, рассеиванию ее в воздухе и попаданию в перевозимые ТС продукты. Слой *b*, а также торцевые крышки, верхние и нижние части борта покрывались цветным эпоксидным гелькоутом без добавок нанопорошка корунда, так как не испытывали трения перевозимого груза.

Входящие детали позиции 1–3 (рис. 2) имели малую жесткость. Таким образом, основой для построения алгоритма функционирования выбрана трехслойная пластинка из ПКМ. Для нее главным элементом построенного алгоритма управления использованы три уравнения общего изгиба трехслойной пластинки¹³ (рис. 3), где увеличенная толщина внутреннего, контактирующего с грузом слоя, состоящего из слоев 1–4 (рис. 2), учитывалась в их решении путем введения в коэффициенты уравнений необходимой жесткости [20]. Слои 4 и 6 состояли из нескольких листов стеклоткани с поворотом нити основы на 30°. Данный прием позволил считать в первом приближении материал слоев 4 и 6 изотропным.



Р и с. 3. Трехслойная пластинка:
1 – внешний слой; 2 – внутренний, прилегающий к грузу слой;
3 – средний слой (шестигранные соты)

Fig. 3. Three-layer plate:
1 – outer layer; 2 – inner layer adjacent to the load; 3 – middle layer (hexagonal honeycomb)

Примечание: q – нормальная, распределенная по всей поверхности внутреннего слоя, нагрузка; a – длина пластинки; b – ширина пластинки; 0 – начало координат; x, y, z – оси координат; δ_1 – толщина внешнего слоя пластинки; δ_2 – толщина внутреннего слоя пластинки; δ_3 – толщина среднего слоя.

Note: q – normal load distributed over the entire surface of the inner layer; a – plate length; b – plate width; 0 – origin; x, y, z – coordinate axes; δ_1 – thickness of the outer layer of the plate; δ_2 – thickness of the inner layer of the plate; δ_3 – thickness of the middle layer.

Уравнения равновесия трехслойной пластинки, находящейся под действием поперечной нагрузки q и распределенных изгибающих моментов X_M и Y_M при условии $\delta_1 = \delta_2 = \delta$ имеют вид¹⁴:

$$L_{11}w + L_{12}u + L_{13}v = \frac{1-\mu^2}{2E\delta} q; \quad (1)$$

¹³ Hoff N.J. Bending and Buckling of Rectangular Sandwich Plates. Washington: NASA TN 2225; 1950. URL: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=3956467> (дата обращения: 17.04.2025).

¹⁴ Там же.

$$L_{21}w + L_{22}u + L_{23}v = \frac{1-\mu^2}{E\delta} n_x; \quad (2)$$

$$L_{31}w + L_{32}u + L_{33}v = \frac{1-\mu^2}{E\delta} n_y, \quad (3)$$

где $L_{11}, L_{12}, L_{13}, L_{21}, L_{22}, L_{23}, L_{31}, L_{32}, L_{33}$ – дифференциальные операторы; w – нормальное перемещение (вдоль оси z), одинаковое для всех слоев, м; u – перемещение в слое 2 относительно срединной поверхности по оси x , м; v – перемещение в слое 2 относительно срединной поверхности по оси y , м; E – модуль продольной упругости, Па; δ – толщина внешних и внутренних слоев, м; q – нормальная распределенная нагрузка на борт, Па; n_x, n_y – нормальные антисимметричные усилия, Н; μ – коэффициент поперечной деформации (Пуассона) для слоев 1 и 2 (рис. 3).

Здесь дифференциальные операторы L_{ij} определяли следующим образом:

$$L_{11} = \frac{D(1-\mu^2)}{E\delta} \Delta^2 - \frac{G_c(2h+\delta)^2(1-\mu^2)}{4E\delta h} \Delta, \quad (4)$$

$$L_{12} = L_{21} = -\frac{G_c(2h+\delta)(1-\mu^2)}{2E\delta h} \cdot \frac{\partial}{\partial x}, \quad (5)$$

$$L_{13} = L_{31} = -\frac{G_c(2h+\delta)(1-\mu^2)}{2E\delta h} \cdot \frac{\partial}{\partial y}, \quad (6)$$

$$L_{22} = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{1-\mu}{2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial y^2} - \frac{G_c(1-\mu^2)}{E\delta h}, \quad (7)$$

$$L_{23} = L_{33} = \frac{1+\mu}{2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial x \partial y}, \quad (8)$$

$$L_{33} = \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{1-\mu}{2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{G_c(1-\mu^2)}{E\delta h}, \quad (9)$$

где $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ – двумерный оператор Лапласа, $\Delta^2 = \frac{\partial^4}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4}{\partial y^4}$,

G_c – модуль сдвига слоя 3, Па; h – общая толщина пластинки, м; x, y – соответствующие координаты, м; $D = \frac{E\delta^3}{12(1-\mu^2)}$ – жесткость наружных слоев, Нм.

Нормальные антисимметричные усилия n_x и n_y , равномерно распределенные по толщине слоев 1 и 2 пластинки (рис. 3), соответствовали действию относительно осей x и y изгибающих моментов X_M и Y_M :

$$X_M = 2n_x \left(h + \frac{\delta}{2} \right), \quad Y_M = 2n_y \left(h + \frac{\delta}{2} \right).$$

Спецификой напряженно-деформированного состояния трехслойных или многослойных пластинок, находящихся под нормальной внешней нагрузкой, является то, что в зонах их прилегания к опорам усилия со всех элементов конструкции передаются на один слой¹⁵. Учитывая это и то, что слои 2, 4, 5, 6 (рис. 2) представлены на рисунке 3 одним слоем 2 с суммарной жесткостью, которая считалась жесткостью силовой пластины δ (рис. 1), расчет на общий изгиб трехслойных симметричных по толщине пластинок в большинстве случаев приводил к решению тех же уравнений, что и расчет трехслойных пластинок с несимметричным по толщине расположением слоев.

С учетом того, что пластинка (рис. 3) нагружена только нормальной распределенной нагрузкой q , уравнения равновесия (1)–(3) свели к одному, используя функцию перемещений U :

$$D_z \left[1 - \frac{1-\mu}{2} \chi_c \Delta \right] \left[1 - \chi_c \frac{2D_2}{D_z} \Delta \right] \Delta \Delta U = q; \quad (10)$$

$$w = (1 - \chi_c \Delta) \left[1 - \frac{1-\mu}{2} \chi_c \Delta \right] U; \quad (11)$$

$$u = -\frac{\delta_3 + \delta_2}{2} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left[1 - \frac{1-\mu}{2} \chi_c \Delta \right] U; \quad (12)$$

$$v = -\frac{\delta_3 + \delta_2}{2} \cdot \frac{\partial}{\partial y} \left[1 - \frac{1-\mu}{2} \chi_c \Delta \right] U, \quad (13)$$

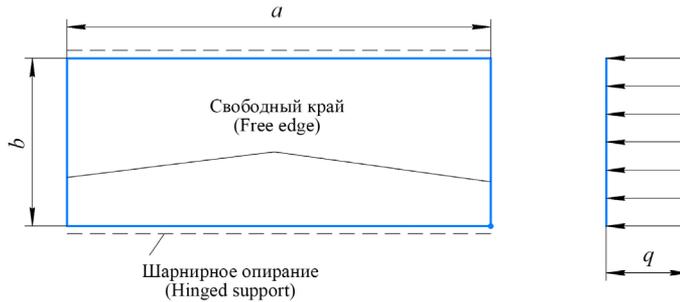
где $D_z = \frac{E_2 \delta_2 (\delta_3 + \delta_2)^2}{2(1-\mu_2^2)} + 2D_2$ – жесткость трехслойной пластинки;

$\chi_c = \frac{E_2 \delta_3 \delta_2 (1-\mu_2^2)}{2G_c}$ – гибкость среднего слоя 3; E_2 – модуль упругости внутреннего слоя 2, Па; μ_2 – коэффициент Пуассона внутреннего слоя 2;

$D_2 = \frac{E_2 \delta_2^3}{12(1-\mu_2^2)}$ – цилиндрическая жесткость внутреннего слоя 2, Нм.

Учитывая большую жесткость деталей 9, 11 (рис. 1), а также возможность установки надставных бортов, построена расчетно-силовая схема загрузки борта внешними силами (рис. 4). Постоянная внешняя нагрузка в решении задачи искривления пластинки-борта задавалась по максимальному значению у нижней части борта, примыкающей к платформе прицепа ТС.

¹⁵ Кобелев В.Н., Коварский Л.М., Тимофеев С.И. Расчет трехслойных конструкций. М.: Машиностроение; 1984. 30 с.



Р и с. 4. Расчетная схема

F i g 4. Calculation scheme

Примечание: q – нормальная, распределенная по всей поверхности внутреннего слоя, нагрузка; a – длина пластинки; b – ширина пластинки.

Note: q – normal load distributed over the entire surface of the inner layer; a – plate length; b – plate width.

Шарнирное опирание по верхней части борта можно объяснить влиянием стального профиля *II* (рис. 1), который свободно проходил через внутреннюю часть композитной детали *2* и закреплен шпильками к кронштейнам *1*, *5*. Профиль *II* выступал в роли шарнирной опоры, вокруг которой при изгибе от нагрузки q осуществлялся поворот сечений борта.

Граничные условия заданы с учетом принципа Сен-Венана и стесненности деформации свободных краев пластинки из-за большой жесткости деталей *2*, *6*, *II* (рис. 1).

Шарнирное опирание:

$$w = 0, \text{ при } y = 0, b; \quad \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = 0, \text{ при } y = 0, b; \quad u = 0 \text{ при } y = 0, b; \quad v = 0 \text{ при } y = 0, b. \quad (14)$$

Свободный край:

$$-D_z \left(\frac{\partial^3 w}{\partial x^3} + (2 - \mu_2) \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial y^2} \right) = 0, \text{ при } x = 0, a; \quad (15)$$

$$-D_z \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \mu_2 \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) = 0, \text{ при } x = 0, a; \quad (16)$$

$$\begin{aligned} u &= 0 \text{ при } y = 0, a; \\ v &= 0 \text{ при } y = 0, a. \end{aligned} \quad (17)$$

Краевая задача (10)–(17) решается в замкнутом виде, либо одним из численных методов, в частности методом конечных разностей, где очень точно можно задать необходимые граничные условия в каждом узле сетки (шарнирные – в опорах борта, свободный край – между опорами)¹⁶. В результате этого получены величины внутренних сил и напряжений в элементах рассматриваемой пластины в случае статической нагрузки.

¹⁶ Александров А.Я., Брюккер Л.Э., Куршин Л.М., Прусаков А.П. Расчет трехслойных панелей.

При столкновении с внутренним листом из ПКМ 3 (рис. 2) твердого тела (часть перевозимого груза), движущегося с ускорением, полисиликон 1, находящийся в одной из ячеек сот 2, перешел в упругое состояние.

Образовавшийся упругий объем полисиликона в ячейке сот 2 представили в виде круглой пластинки радиуса r , вписанной в шестигранник.

При опирании на деталь 1 (рис. 2) полученной пластинки рассматривали последнюю как пластинку на упругом основании.

Напряженно-деформированное состояние такой пластинки исследовали на основе решения дифференциального уравнения¹⁷:

$$\frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} \left(r \cdot \frac{dw_n}{dr} \right) \right] = \frac{q_n - k_c w_n}{D_n}, \quad (18)$$

где q_n – статически приложенная распределенная внешняя нагрузка, возникающая от удара грузом, движущимся с ускорением; $k_c w_n$ – реакция основания 2 (рис. 2); k_c – коэффициент пропорциональности. Все остальные величины обозначаются идентично выражениям (1–9), но имеют индекс n , говорящий об их принадлежности к пластинке на упругом основании¹⁸.

Заменив q_n на сосредоточенную силу F , приложенную в центре пластинки, на основе решения уравнения (18) с граничными условиями на контуре:

$$w_n = 0; \quad -D_n \left(\frac{d^2 w_n}{dr^2} + \frac{\mu_n}{r} \cdot \frac{dw_n}{dr} \right) = 0, \quad (19)$$

получили

$$w_{n\max} = \frac{Fl^2}{8D_n}, \quad (20)$$

$$\text{где } l = 4 \sqrt{\frac{D_n}{k_c}}, \quad D_n = \frac{E_n h_n^3}{12(1-\mu_n^2)}.$$

Зная $w_{n\max}$, нашли максимальные напряжения от силы F ¹⁹:

$$\sigma_{n\max} = 0,275(1-\mu_n) \frac{F}{h_n^2} \lg \frac{E_n h_n^3}{k_c f^4}. \quad (21)$$

Здесь: при $r_n < 1,724h_n$, $f = \sqrt{1,6r_n^2 + h_n^2} - 0,675h_n$; при $r_n > 1,724h_n$, $f = z_n$; сосредоточенная сила соответствует $r_n = 0$.

¹⁷ Александров А.Я., Брюккер Л.Э., Куршин Л.М., Прусаков А.П. Расчет трехслойных панелей.

¹⁸ Пастернак П.Л. Основы нового метода расчета фундаментов на упругом основании при помощи двух коэффициентов постели. М.: Госстройиздат; 1954. 56 с.

¹⁹ Westergaard H.M. Theory of Concrete Pavement Design. In: Proceedings of the 7th Annual Meeting of the Highway Research Board. Washington: National Research Council; 1927. 175.

Для нахождения коэффициента пропорциональности k_c^{20} , воспользовались моделью слоистого полупространства и рассчитали модуль упругости для каждого слоя с номером $i = 1/p$.

$$E_n' = E_n \frac{(1 - \mu_n)}{(1 + \mu_n)(1 - 2\mu_n)}. \quad (22)$$

Тогда, коэффициент пропорциональности k_c равен:

$$k_c = \sum_{i=1}^p \frac{E_{ni}' (1 - \mu_{ni}) \gamma_i B_i^2}{2(1 + \mu_{ni})(1 - 2\mu_{ni})} \left(1 - e^{-2\gamma_i h_{ni}}\right), \quad (23)$$

где $\gamma_i = \frac{4(1 - 2\mu_{ni})}{\sqrt{\pi A_n (1 - \mu_{ni})^2}}$, $A_n = \pi r^2$ – площадь контакта пластинки с опорой 2 (рис. 2), м²; постоянная $B_i = 1$ при $i = 1$; при $i > 1$, $B_i = B_{i-1} \cdot e^{-(\gamma_{i-1} h_{n(i-1)})}$.

Учитывая движение перевозимого груза, ввели коэффициент динамичности K_d . Тогда максимальное напряжение в центре упругой пластинки стало:

$$\sigma_{d\max} = K_d \sigma_{n\max}, \quad (24)$$

K_d определили по формуле²¹:

$$K_d = 1 + \sqrt{1 + \frac{2H}{w_{n\max}}}, \quad (25)$$

где H – высота падения твердого тела,двигающегося с ускорением, м.

Некоторую трудность в реализации алгоритма управления представляло собой отсутствие экспериментальных или нормативных данных о величине σ_{adm} упругого полисиликона. «В запас» ориентировались на величину σ_{adm} для природного каучука. Кроме того, не изучено изменение величины адгезии между упругим полисиликоном и поверхностью пластины 4 (рис. 2), выполненной из стеклокомпозита. Чтобы увеличить адгезию, прилегающий к полисиликону лист стеклоткани должен иметь более крупную нить.

Для упрощения алгоритма управления проектированием борта транспортного средства с учетом специфики загрузки кузова, а также экспериментальных данных²² приняли, что под действием внешней нагрузки q начал «работать» только внутренний слой 2 (рис. 3).

Тогда воспользовались формулами²³ для определения максимальных нормальных и касательных напряжений в пластинке (рис. 3, 4).

²⁰ Славкина Е.В. Конструирование силовых корпусных элементов транспортного средства сельскохозяйственного назначения из композитных материалов.

²¹ Там же.

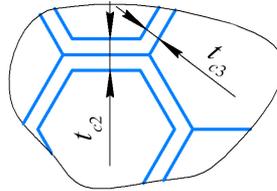
²² Александров А.Я., Брюккер Л.Э., Куршин Л.М., Прусаков А.П. Расчет трехслойных панелей.

²³ Там же.

Максимальные нормальные напряжения $\sigma_{12\max}$ во внутреннем 2 (верхнем) несущем слое находилось в сечении $y = b/2^{24}$, индекс 1 – плоскость анизотропии, параллельная плоскости xOy , индекс 2 – номер слоя:

$$\sigma_{12\max} = \frac{q\bar{B}_2}{2B_{\text{мп}}(h_2 - h_1)^2} \left(\frac{\delta_3 B_{\text{мп}}}{G_{233}} + \frac{b^2}{8} \right) - \frac{q}{h_2 - h_1} \cdot \frac{\delta_3 B_{\text{мп}}}{\delta_2 G_{233}}, \quad (26)$$

где: $\bar{B}_2 = \frac{2B_{\text{мп}}(h_2 - h_1) + \delta_2 B_2}{\delta_2}$; $B_{\text{мп}} = \frac{B_1 \cdot B_2}{B_1 + B_2}$; $B_1 = \frac{E_1 \delta_1}{1 - \mu_1^2}$; $B_2 = \frac{E_2 \delta_2}{1 - \mu_2^2}$; $h_1 = \frac{\delta_1(1 + \xi_1)}{2}$;
 $h_2 = -\frac{\delta_2(1 + \xi_2)}{2}$; $\xi_1 = \frac{\delta_3}{\delta_1}$; $\xi_2 = \frac{\delta_3}{\delta_2}$; G_{233} – приведенный модуль сдвига в плоскости yOz для сотового шестигранного заполнителя: $G_{233} = \frac{1,2G_{M3}t_c}{a\sqrt{3}}$;
 t_c – средняя толщина стенки сот; G_{M3} – модуль сдвига материала заполнителя;
 $a = \frac{G_{Mc2}t_{c2}}{G_{Mc3}t_{c3}}$; t_{c2} , t_{c3} – толщины стенок сот (рис. 5); G_{Mc2} , G_{Mc3} – модули сдвига материала стенок с толщиной t_{c2} и t_{c3} соответственно; μ_1 , μ_2 – коэффициенты Пуассона для стенок, имеющие номера 1 и 2.



Р и с. 5. Размеры сотового заполнителя
 F i g. 5. Dimensions of honeycomb filler

Примечание: t_{c2} , t_{c3} – толщины стенок сот.

Note: t_{c2} , t_{c3} – thickness of the honeycomb walls.

Касательное напряжение в заполнителе при $y = b$:

$$\tau_{133} = \pm \frac{qb}{2(h_2 - h_1)}, \quad (27)$$

где индексы напряжения: 1 – плоскость анизотропии; 3 – плоскость сдвига и последняя 3 – номер слоя.

Далее, в предположении деформирования пластинки в пределах закона Гука, определили максимальные нормальные напряжения в зоне контакта упругой пластинки из полисиликона и внутреннего несущего слоя 2 (рис. 3).

Для этого рассмотрели такую же задачу изгиба пластинки, как на рисунке 3, но при воздействии на пластинку нагрузки q_{nd} , приложенной в месте удара.

$$q_{nd} = \frac{K_d F}{A_n} = \frac{K_d F}{\pi r^2}. \quad (28)$$

²⁴ Александров А.Я., Брюккер Л.Э., Куршин Л.М., Прусаков А.П. Расчет трехслойных панелей.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Наихудшим местом удара является геометрический центр площади прямоугольника внутреннего несущего слоя 2 со сторонами длиной a и шириной b .

Через тонкую пластинку – лист 3 (рис. 2), внешняя нагрузка (удар) передавалась по площади A_{nk} квадрата, вписанного в окружность пластинки из полисиликона радиуса r .

Такая аппроксимация может быть объяснена неравномерностью распределения упругих свойств полисиликона по днищу шестигранной ячейки. В месте удара механические характеристики полисиликона соответствуют характеристикам, полученным при исследовании повышения стойкости к ударным воздействиям композитных узлов сельхозмашин применением упруговязкопластичных жидкостей [1]. У границ ячейки последние предположительно меняются, что не способствует полной передаче внешней нагрузки на упругое основание.

Согласно методике решения подобных задач для прямоугольных трехслойных пластинок²⁵ $\sigma'_{12\max}$ находится от действия q_{nd} , приложенной на ограниченной площади прямоугольника A_n , в центре пластинки. При условии $A_n = A_{nk}$ максимальное нормальное напряжение, действующее в центре верхней плоскости внутреннего несущего слоя 2 (рис. 3) при $x = \frac{a}{2}$ и $y = \frac{b}{2}$ рассчитано, согласно принципу независимости действия сил,

$$\sigma_{\Sigma} = \sigma_{12\max} + \sigma'_{12\max}. \quad (29)$$

Решая задачу прочности $\sigma_{\Sigma} \leq \sigma_{adm}$ для слоя 2 с учетом касательных напряжений τ_{Σ} в среднем слое, можно осуществить выбор геометрических параметров пластинки и включить данную процедуру в алгоритм управления, а затем и функционирования системы.

Задача проектирования рациональной конструкции композитного борта с учетом всех компонентов его эксплуатации достаточно сложна.

Так, весьма важны вопросы ремонтпригодности изделия, его экономической эффективности и экологичности как в процессе работы ТС в агропромышленном комплексе, так и при его утилизации.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЯ

На основе проведенного анализа существующих технических решений при создании машин в сельскохозяйственной отрасли было предложено использование полимерных композитов как основы для создания конструкций, материал которых имеет управляемые механические характеристики, функционально связанные с величинами внешних возмущающих факторов.

Предлагается процедура определения напряженно-деформированного состояния композитной многослойной пластинки, предназначенная для построения алгоритма управления проектированием композитного борта кузова транспортного средства (прототипом которого является стальной борт ПСЕ-20). При этом

²⁵ Александров А.Я., Брюккер Л.Э., Куршин Л.М., Прусаков А.П. Расчет трехслойных панелей.

учитывается, что материал некоторых элементов рассматриваемой пластинки меняет свои механические характеристики в зависимости от изменения внешней нагрузки, что соответствует цели данного исследования.

Известный эффект «затвердевания» дилатантной жидкости при ее резком ускорении впервые использован здесь в качестве способа изменения механических характеристик элемента борта в виде полисилоконовой пластинки на упругом основании, поглощающей энергию удара при загрузке кузова крупнокузовым грузом.

К недостаткам предлагаемой конструкции можно отнести низкую износостойчивость внутренней, прилегающей к перевозимому грузу, поверхности композитного борта. Решение данной проблемы видится в разработке упругого гелькоута с наполнителем из нанокристаллического порошка корунда, которым следует покрыть внутреннюю поверхность борта.

Разработанная методология перехода от традиционных конструкций к перспективным моделям, имеющим адаптивные элементы или устройства, способные автоматически управлять напряженно-деформированным состоянием путем изменения либо структурной формулы входящих механизмов, либо физико-механических характеристик материала некоторых звеньев, позволяет одновременно значительно снизить материалоемкость и увеличить ресурс входящих деталей и узлов, что дает возможность использовать ее для реализации широкого круга задач рационального проектирования машин сельскохозяйственной отрасли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Астахов М.В., Славкина Е.В. Повышение стойкости к ударным воздействиям композитных узлов сельхозмашин применением упруговязкопластичных жидкостей. *Инженерные технологии и системы*. 2020;30(2):268–286. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202002.268-286>
2. Бочкарева С.А., Гришаева Н.Ю., Люкшин Б.А., Панов И.Л., Панин С.В. Получение композиций с заданным набором физико-механических свойств с использованием трех управляющих параметров. *Физическая мезомеханика*. 2020;23(4):43–50. <https://www.elibrary.ru/mlnarx>
3. Астахов М.В., Славкина Е.В. К вопросу проектирования балочного элемента на основе полимерных композиционных материалов с учетом ударных воздействий. *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2020;(4):1. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2020-4-1969>
4. Полилов А.Н., Власов Д.Д., Татусь Н.А. Уточненный критерий расслоения при изгибе композитной балки. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2023;89(10):63–73. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-10-63-73>
5. Власов Д.Д., Склемина О.Ю., Поляков А.Э. Об упрощенных методах определения упругих постоянных слоистых полимерных композитов. *Пластические массы*. 2023;(11–12):17–20. <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2023-11-12-17-20>
6. Lebedev D., Okunev A., Aleshin M., Ivanov K., Klyavin O., Nikulina S. и др. Applicability of Polymer Composite Materials in the Development of Tractor Falling-Object Protective Structures (FOPS). *Materials Physics and Mechanics*. 2017;34(1):90–96. https://doi.org/10.18720/MPM.3412017_11
7. Leontev A., Aleshin M., Klyavin O., Borovkov A. Optimal Design of Power Frames for Special Purpose Vehicles' Cockpits with Regard to their Eigenfrequencies and Shock Resistance. In: *Matec Web of Conferences*. Sofia: EDP Sciences; 2017. p. 02003. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814802003>
8. Астахов М.В., Славкина Е.В., Сорокина И.И. К повышению надежности сельскохозяйственных прицепов. *Наука в центральной России*. 2023;61(1):66–76. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2023-1-66-76>

9. Kozlov M.V., Sheshenin S.V. Modeling the Progressive Failure of Laminated Composites. *Mechanics of Composite Materials*. 2016;(51):695–706. <https://doi.org/10.1007/s11029-016-9540-0>
10. Дзоценидзе Т.Д., Козловская М.А. Использование полимерных материалов при создании малогабаритных транспортных средств для агропромышленного комплекса. *Конструкции из композиционных материалов*. 2009;(2):35–44. <https://www.elibrary.ru/kapuuj>
11. Димитриенко Ю.И., Федонюк Н.Н., Губарева Е.А., Сборщиков С.В., Прозоровский А.А., Ерасов В.С. и др. Моделирование и разработка трехслойных композиционных материалов с сотовым наполнителем. *Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия «Естественные науки»*. 2014;(5):66–81. URL: <https://vestniken.bmstu.ru/catalog/mathsim/hidden/527.html> (дата обращения: 04.02.2026).
12. Гавва Л.М., Фирсанов В.В. Математические модели и методы расчета напряженно-деформированного состояния панелей летательных аппаратов из композиционных материалов с учетом технологии изготовления. *Известия Российской академии наук. Механика твердого тела*. 2020;(3):122–133. <https://doi.org/10.31857/S057232992003006X>
13. Mayes J.S., Hansen A.C. A Comparison of Multicontinuum Theory Based Failure Simulation with Experimental Results. *Composites Science and Technology*. 2004;64(3–4):517–527. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(03\)00221-5](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00221-5)
14. Cross R. Elastic and Viscous Properties of Silly Putty. *American Journal of Physics*. 2012;80(10):870–875. <https://doi.org/10.1119/1.4732086>
15. Мазалов Ю.А., Берш А.В., Витязь П.А., Судник Л.В. Аллюмооксидные порошковые наноматериалы конструкционного и функционального назначения. *Труды ГОСНИТИ*. 2014;(115):42–47. <https://www.elibrary.ru/sjldpn>
16. Черноиванов В.И. Перспективы применения нанотехнологии как прорывного фактора повышения качества обслуживания и ремонта машин. *Труды ГОСНИТИ*. 2010;(105):4–12. URL: <http://www.gosniti.com/publish1.html> (дата обращения: 12.04.2025).
17. Емельянов М.Д. Ремонт осмотических повреждений наружной обшивки из стеклопластика. *Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства*. 2018;(50–51):14–21. <https://www.elibrary.ru/uyidue>
18. Сивцов В.Н., Котин А.В. Восстановление корпусных деталей комбинированными покрытиями. *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 2007;(8):51–53. <https://www.elibrary.ru/hfxolv>
19. Сенин П.В., Чаткин М.Н., Кильмяшкин Е.А. Техничко-экономическое обоснование применения аддитивных технологий при восстановлении сельскохозяйственной техники. *Инженерные технологии и системы*. 2025;35(4):770–785. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202504.770-785>
20. Астахов М.В. Управление полями внутренних сил тонкостенных оболочечных систем сельхозмашин. *Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия Машиностроение*. 2000;(4):47–58. URL: <https://vestnikmach.bmstu.ru/catalog/design/hidden/689.html> (дата обращения: 14.04.2025).

REFERENCES

1. Astakhov M.V., Slavkina E.V. Improving the Shock Resistance of Agricultural Composite Units Using Visco-Elastic Fluids. *Engineering Technologies and Systems*. 2020;30(2):268–286. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202002.268-286>
2. Bochkareva S.A., Grishaeva N.Yu., Lyukshin B.A., Panov I.L., Panin S.V. Synthesis of Composites with a Given Set of Physical and Mechanical Properties Using Three Control Parameters. *Fizicheskaya mezomekhanika*. 2020;23(4):43–50. (In Russ., abstract in Eng.) <https://www.elibrary.ru/mlnarx>
3. Astakhov M.V., Slavkina E.V. On the Issue of Designing A Beam Element of Polymer Composite Materials, Considering Shock Effects. *Engineering Journal: Science and Innovation*. 2020;(4):1. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2020-4-1969>

4. Polilov A.N., Vlasov D.D., Tatus' N.A. Specified Criterion for Delamination Upon Bending of a Composite Beam. *Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*. 2023;89(10):63–73. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-10-63-73>
5. Vlasov D.D., Sklemina O.Y., Polyakov A.E. On Simplified Methods for Determining the Elastic Constants of Layered Polymer Composites. *Plasticheskie Massy*. 2023;(11–12):17–20. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2023-11-12-17-20>
6. Lebedev D., Okunev A., Aleshin M., Ivanov K., Klyavin O., Nikulina S., et al. Applicability of Polymer Composite Materials in the Development of Tractor Falling-Object Protective Structures (FOPS). *Materials Physics and Mechanics*. 2017;34(1):90–96. https://doi.org/10.18720/MPM.3412017_11
7. Leontev A., Aleshin M., Klyavin O., Borovkov A. Optimal Design of Power Frames for Special Purpose Vehicles' Cockpits with Regard to their Eigenfrequencies and Shock Resistance. In: *Matec Web of Conferences*. Sofia: EDP Sciences; 2017. p. 02003. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814802003>
8. Astakhov M.V., Slavkina E.V., Sorokina I.I. To Increase the Reliability of Agricultural Trailers. *Science in the Central Russia*. 2023;61(1):66–76. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2023-1-66-76>
9. Kozlov M.V., Sheshenin S.V. Modeling the Progressive Failure of Laminated Composites. *Mechanics of Composite Materials*. 2016;(51):695–706. <https://doi.org/10.1007/s11029-016-9540-0>
10. Dzotsenidze T.D., Kozlovskaya M.A. Use of Polymer Materials by Creating of Small-Size Transport Vehicles for an Agricultural Sector. *Composite Materials Constructions*. 2009;(2):35–44. (In Russ., abstract in Eng.) <https://www.elibrary.ru/kapuuj>
11. Dimitrienko Yu.I., Fedonyuk N.N., Gubareva E.A., Sborshchikov S.V., Prozorovskiy A.A., Erasov V.S., et al. Modeling and Development of Three-Layer Sandwich Composite Materials with Honeycomb Core. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Natural Sciences*. 2014;(5):66–81. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://vestniken.bmstu.ru/catalog/mathsim/hidden/527.html> (accessed 04.02.2026).
12. Gavva L.M., Firsanov V.V. Mathematical Models and Methods for Calculating the Stress-Strain State of Aircraft Panels From Composite Materials Taking Into Account the Production Technology. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. mekhanika tverdogo tela*. 2020;(3):122–133. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.31857/S057232992003006X>
13. Mayes J.S., Hansen A.C. A Comparison of Multicontinuum Theory Based Failure Simulation with Experimental Results. *Composites Science and Technology*. 2004;64(3–4):517–527. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(03\)00221-5](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00221-5)
14. Cross R. Elastic and Viscous Properties of Silly Putty. *American Journal of Physics*. 2012;80(10):870–875. <https://doi.org/10.1119/1.4732086>
15. Mazalov Y.A., Bersh A.V., Knight P.A., Sudnik L.V. Alumina Powder Nanomaterials Structural and Functional Purposes. *Trudy GOSNITI*. 2014;(115):42–47. (In Russ., abstract in Eng.) <https://www.elibrary.ru/sjldpn>
16. Chernoiyanov V.I. Use Nanotechnology as Proryvnogo Factor of Quality Service and Repair Machines. *Trudy GOSNITI*. 2010;(105):4–12. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <http://www.gosniti.com/publish1.html> (accessed 12.04.2025).
17. Emelyanov M.D. Repair of Osmotic Damage to the Fiberglass Outer Shell Plating. *Nauchno-tekhnicheskij sbornik Rossijskogo morskogo registra sudohodstva*. 2018;(50–51):14–21. (In Russ., abstract in Eng.) <https://www.elibrary.ru/uyidue>
18. Sivtsov V.N., Kotin A.V. Restoration of Body Parts with Combined Coatings. *Traktory i sel'skohozyajstvennyye mashiny*. 2007;(8):51–53. (In Russ., abstract in Eng.) <https://www.elibrary.ru/hfxolv>
19. Senin P.V., Chatkin M.N., Kil'myashkin E.A. Feasibility Study of Additive Technologies Application in Restoring Agricultural Machinery. *Engineering Technologies and Systems*. 2025;35(4):770–785. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202504.770-785>

20. Astahov M.V. Manipulation by Fields of Internal Forces of Agricultural Machine Thin-Wall Shell Systems. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*. 2000;(4):47–58. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://vestnikmach.bmstu.ru/catalog/design/hidden/689.html> (accessed 14.04.2025).

Об авторах:

Астахов Михаил Владимирович, доктор технических наук; профессор, профессор кафедры МК6 колесные машины и прикладная механика Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана, (105005, Российская Федерация, г. Москва, ул. Бауманская 2-я, д. 5, стр. 1.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8675-1611>, Researcher ID: ACU-1195-2022, mvastahov@gmail.com

Славкина Екатерина Викторовна, кандидат технических наук, доцент кафедры МК9 подъемно-транспортные системы Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана, (105005, Российская Федерация, г. Москва, ул. Бауманская 2-я, д. 5, стр. 1.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5889-5957>, Researcher ID: ADB-9323-2022, slavkina@bmstu.ru

Вклад авторов:

М. В. Астахов – постановка задачи, разработка математической модели и ее реализация, формирование основной концепции исследования.

Е. В. Славкина – анализ литературных источников, разработка алгоритма проектирования пластинки из полисиликона на упругом основании при ударе, подготовка текста и графических материалов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 21.05.2025; поступила после рецензирования 06.10.2025;
принята к публикации 30.10.2025*

About the authors:

Mikhail V. Astakhov, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Department of the Wheel Machines and Applied Mechanics, Bauman Moscow State Technical University (5, 2-nd Baumanskaya St., Moscow 105005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8675-1611>, Researcher ID: ACU-1195-2022, mvastahov@gmail.com

Ekaterina V. Slavkina, Cand.Sci. (Eng.), Department of the Lifting and transport systems, Bauman Moscow State Technical University (5, 2-nd Baumanskaya St., Moscow 105005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5889-5957>, Researcher ID: ADB-9323-2022, slavkina@bmstu.ru

Authors contribution:

M. V. Astakhov – problem statement, development of the mathematical model and its implementation, and formulation of the main study concept.

E. V. Slavkina – literature review, development of an algorithm for designing a polysilicon plate on an elastic base on impact, preparation of the manuscript text and graphic materials.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 21.05.2025; revised 06.10.2025; accepted 30.10.2025

**ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ /
INSTRUMENTS AND METHODS OF EXPERIMENTAL PHYSICS**<https://doi.org/10.15507/2658-4123.036.202601.204-220>EDN: <https://elibrary.ru/gijsku>

УДК / UDK 674.8:543.4

*Оригинальная статья / Original article***Физико-химические характеристики
древесного наполнителя, прошедшего
двухступенчатую обработку****К. Г. Аникеева** , **Р. Р. Сафин***Казанский национальный исследовательский
технологический университет,**г. Казань, Российская Федерация, <https://ror.org/03shav252>* *doomksen@mail.ru**Аннотация*

Введение. Важной проблемой современной промышленности является загрязнение окружающей среды изделиями из пластика, которые накапливаются в экосистемах и обладают высокой стойкостью к разложению. Это создает угрозу для природных ресурсов и требует разработки альтернативных материалов, сочетающих прочность и экологическую безопасность. Перспективный класс биоразлагаемых материалов представляют древесно-полимерные композиты, недостатком которых является сложность в обеспечении прочного взаимодействия между гидрофильным древесным наполнителем и гидрофобной полимерной матрицей, влияющим на физико-механические и эксплуатационные свойства.

Цель исследования. Исследование влияния двухступенчатой обработки древесного наполнителя на структурные изменения в его составе и физико-химические свойства полученных композитов.

Материалы и методы. В качестве объекта исследования выбраны образцы сосновой древесной муки, подвергнутые двухступенчатой обработке. Для анализа молекулярной структуры и химических изменений применен метод инфракрасной спектроскопии. Используются методы анализа водопоглощения и определения предела прочности при изгибе и растяжении.

Результаты исследования. Определена прочность при изгибе и растяжении, а также степень водопоглощения материала. Термическая обработка привела к деградации целлюлозы и лигнина, уменьшению влажности и улучшению механических свойств. Озонирование повысило содержание оксигенсодержащих групп, усилило адгезию с полимерной матрицей и снизило водопоглощение на 50 %. Прочность при растяжении увеличилась на 17,89 %, при изгибе – на 15,6 %.

Обсуждение и заключение. Предложенный метод модификации древесного наполнителя позволяет значительно улучшить эксплуатационные характеристики древесно-полимерных композитов. Материал может быть использован при производстве биоразлагаемых емкостей для посадки растений, что открывает перспективы его применения в экологических технологиях. Полученные результаты подтверждают эффективность двухступенчатого подхода к трансформации наполнителя и целесообразность его применения в промышленном производстве.

© Аникеева К. Г., Сафин Р. Р., 2026

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

Ключевые слова: биокompозиты, физико-химические свойства, инфракрасная спектроскопия, предел прочности на разрыв и изгиб, термопластичный крахмал, древесная мука

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Аникеева К.Г., Сафин Р.Р. Физико-химические характеристики древесного наполнителя, прошедшего двухступенчатую обработку. *Инженерные технологии и системы*. 2026;36(1):204–220. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.036.202601.204-220>

Physical and Chemical Characteristics of Wood Filler Two-Stage Processing

K. G. Anikeeva ✉, R. R. Safin

Kazan National Research Technological University,
Kazan, Russian Federation, <https://ror.org/03shav252>

✉ doomksen@mail.ru

Abstract

Introduction. An acute problem of modern industry is environmental pollution by plastic products, which are highly resistant to degradation and accumulate in ecosystems. This poses a threat to natural resources and requires the development of alternative materials combining strength and environmental safety. In this context, special attention is paid to wood-polymer composites (WPC), which are a promising class of biodegradable materials. Their drawback is the difficulty in ensuring a strong interaction between the hydrophilic wood filler and hydrophobic polymer matrix that directly affects the physical, mechanical and operational properties.

Aim of the Study. The study is aimed at investigating the effect of two-stage processing of wood filler (thermal modification followed by ozonation) on structural changes in its composition and the physicochemical properties of the obtained composites.

Materials and Methods. The studies were carried out using pine wood flour subjected to two-stage processing. IR spectroscopy was used to analyze the molecular structure and chemical changes. Infrared spectroscopy was used to analyze the molecular structure and chemical changes. There were also used water absorption analysis and determination of bending and tensile strength.

Results. There have been determined the bending and tensile strength, and the degree of water absorption of the material. Thermal treatment resulted in degradation of cellulose and lignin, reduction of humidity and improvement of mechanical properties. Ozonation increased the content of oxygen-containing groups, strengthened adhesion with the polymer matrix and reduced water absorption by 50%. The tensile strength increased by 17.89% and the bending strength by 15.6%.

Discussion and Conclusion. The proposed method of modifying wood filler allows improving significantly the performance characteristics of WPC. The material can be used to produce biodegradable containers for planting that opens up prospects for its application for environmentally friendly technologies. The results obtained confirm the effectiveness of the two-stage approach to filler modification and the feasibility of its use in industrial production.

Keywords: biocomposites, physicochemical properties, IR spectroscopy, tensile and bending strength, thermoplastic starch, wood flour

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

For citation: Anikeeva K.G., Safin R.R. Physical and Chemical Characteristics of Wood Filler Two-Stage Processing. *Engineering Technologies and Systems*. 2026;36(1):204–220. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.036.202601.204-220>

ВВЕДЕНИЕ

В условиях роста экологической нагрузки на окружающую среду большее значение приобретает разработка и внедрение биоразлагаемых материалов, способных заменить традиционные синтетические полимеры. Одним из перспективных направлений в этой области является создание древесно-полимерных композитов (ДПК), сочетающих преимущества возобновляемого сырья и высоких эксплуатационных характеристик. Согласно исследованию зарубежных ученых, мировой рынок ДПК демонстрирует стабильный рост, что связано с увеличением спроса на экологически чистые материалы, доступностью исходных компонентов композита и возможностью переработки¹. Однако широкое применение таких материалов сдерживается рядом проблем, основывающихся на низкой совместимости гидрофильного древесного наполнителя и гидрофобной полимерной матрицы, что приводит к слабой адгезии между компонентами, увеличению водопоглощения и снижению прочностных свойств конечного продукта. Решение этих задач имеет важное значение для создания устойчивых и долговечных композитов, способных найти применение не только в упаковочной промышленности, но и в сельском хозяйстве, строительстве и других отраслях.

Современные исследования демонстрируют, что модификация древесного наполнителя позволяет значительно повысить качество получаемых композитов. Так, термическая обработка древесины при температуре 180–220 °С приводит к снижению содержания гидроксильных групп за счет деградации гемицеллюлозы, что подтверждается данными инфракрасной спектроскопии (ИК-спектроскопии) [1]. Озонирование, в свою очередь, способствует образованию новых оксигенсодержащих функциональных групп на поверхности древесной муки, улучшая ее химическую активность и взаимодействие с полимерной матрицей [2].

Комбинированное применение термической обработки и озонирования открывает новые возможности для оптимизации структуры и свойств ДПК. Двухступенчатая модификация позволяет снизить водопоглощение древесного наполнителя на 40–50 % и увеличить прочность на растяжение на 20–25 %, что объясняется улучшением межфазного взаимодействия между компонентами композита [3].

Актуальной научной задачей становится всестороннее изучение физико-химических трансформаций, происходящих в структуре древесного наполнителя на каждом этапе двухступенчатой модификации. Особый интерес представляет выявление закономерностей, связывающих структурные изменения наполнителя с формированием ключевых эксплуатационных свойств конечного композита: перестройка поверхности, изменение функциональных групп и межфазного взаимодействия. Понимание этих взаимосвязей может позволить целенаправленно управлять характеристиками материала, повышая его механическую прочность, адгезию с матрицей и устойчивость к внешним воздействиям.

Целью данного исследования является изучение влияния двухступенчатой модификации, включающей в себя озонирование с последующей термической обработкой, на физико-химические свойства древесного наполнителя и характеристики ДПК на его основе.

¹ Fabiyi J.S., McDonald A.G., Stark N.M. Surface Characterization of Weathered Wood-Plastic Composites Produced from Modified Wood Flour. In: 9th International Conference on Wood & Biofiber Plastic Composites. Madison: Forest Products Society. 2007. p. 271–275.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В последние годы значительно возрос интерес к разработке биоразлагаемых материалов, в частности ДПК, в связи с чем увеличилось количество как отечественных, так и зарубежных научных публикаций по тематике модификации древесного наполнителя: улучшения его совместимости с полимерной матрицей и повышения эксплуатационных характеристик получаемых композитов.

Одним из ключевых направлений в области создания ДПК является физико-химическая модификация для повышения адгезии с полимерной матрицей. По мнению ряда исследователей, основная проблема заключается в плохой совместимости гидрофильной древесины с гидрофобными термопластичными матрицами, такими как полиэтилен или полипропилен [4–6].

Рассмотрев различные методы поверхностной обработки древесины, включая щелочную обработку, озонирование и плазменную обработку, можно сделать вывод, что комбинированные подходы дают наибольший эффект в улучшении свойств ДПК [7; 8]. Аналогичные выводы представлены исследователями из США, которые показали, что химическая модификация целлюлозных волокон позволяет снизить водопоглощение и повысить механические свойства композита [9].

В ряде работ зарубежных ученых также подчеркивается важность двухступенчатой обработки: термической и последующей химической модификации [10]. А. Р. Могэ показал, что сочетание термической обработки и озонирования способствует снижению содержания свободных ОН-групп и увеличению полярности поверхности наполнителя, что положительно сказывается на прочностных характеристиках материала [11].

Одной из основных трудностей при создании эффективных ДПК является необходимость сохранить экологичность материала при одновременном обеспечении высоких эксплуатационных свойств. Сложность заключается в том, что большинство традиционных методов модификации требуют использования химических реагентов, которые могут быть токсичными или противоречить принципам «экологически чистых материалов» [12; 13]. Кроме того, существует проблема масштабируемости лабораторных методов для промышленного производства. Некоторые исследователи указывают на то, что, хотя многие технологии показывают хорошие результаты в лабораторных условиях, их реализация в промышленных масштабах затруднена из-за высокой энергоемкости и сложности контроля параметров процесса [14–16]. Еще одной актуальной задачей является прогнозирование поведения композита в различных условиях эксплуатации, особенно в условиях повышенной влажности, перепадов температур и воздействия микроорганизмов [17–19]. Отечественные работы сфокусированы на доступных и легко внедряемых технологиях, таких как термическая и озонная обработка, что делает их более применимыми для реализации на производствах [20].

Таким образом, несмотря на значительный прогресс в области модификации древесного наполнителя, задача разработки экологически безопасных методов, способных одновременно улучшить адгезию наполнителя к полимерной матрице и снизить гигроскопичность композита остается нерешенной. Настоящее

исследование направлено на изучение двухступенчатой обработки как перспективного альтернативного метода обработки древесного наполнителя перед введением его в состав композиционного материала.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования

В рамках исследования были проанализированы два образца сосновой муки: исходный, не подвергавшийся обработке, и модифицированный, прошедший последовательно термическую обработку и озонирование.

Методы, оборудование материалы исследования

Для исследования молекулярной структуры веществ использовался метод ИК-спектроскопии, который позволил зарегистрировать на каких частотах поглощалось инфракрасное излучение. Поглощение связано с колебательными переходами в химических связях, что сделало метод особенно чувствительным к функциональным группам и структурным особенностям образца. Измерения выполнены на ИК-Фурье-спектрометре Frontier (PerkinElmer) с использованием приставки, основанной на принципе нарушенного полного внутреннего отражения. Полученные спектры интерпретировались по характерным волновым числам, позволяя отслеживать изменения в химическом составе после обработки.

Для оценки гигроскопичности образцов применялся метод, регламентированный ГОСТ 16483.19-72². Образцы предварительно высушивались в вакуумной сушильной камере при 103 °С в течение 72 часов, после чего помещались в эксикатор с дистиллированной водой. Динамика поглощения влаги фиксировалась путем последовательного взвешивания: первое – через 24 часа, далее – на 2, 3, 6, 9, 13, 20 и 30 сутки.

Прочностные характеристики при изгибе определялись в соответствии с ГОСТ 4648-2014³ на универсальной испытательной машине. Образцы подвергались изгибающей нагрузке с постоянной скоростью 2 мм/мин до момента разрушения.

Предел прочности при растяжении древесно-полимерных композитов измеряли по методике ГОСТ 11.262-2017⁴. Испытания проводились на двухколонной машине GOTECH AI-7000M, оснащенной датчиком на 5 кН и установленным расстоянием между зажимами 60 мм. Образцы, отлитые в форме «лопаток», растягивались со скоростью 50 мм/мин до разрыва, что позволяло зафиксировать максимальное напряжение, выдерживаемое материалом.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рисунке 1 изображен инфракрасный спектр пропускания в графическом виде. По горизонтальной оси X отложены волновые числа (см^{-1}) – величина,

² ГОСТ 16483.19-72. Древесина. Метод определения влагопоглощения. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4294852/4294852264.htm> (дата обращения: 21.05.2025).

³ ГОСТ 4648-2014. Пластмассы. Метод испытания на статический изгиб. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200110853> (дата обращения: 21.05.2025).

⁴ ГОСТ 11.262-2017. Пластмассы. Метод испытания на растяжение URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200158280/titles/65C0IR> (дата обращения: 30.05.2025).

обратная длине волны и напрямую связанная с частотой колебаний химических связей в молекулах. По вертикальной оси Y указано процентное пропускание $\% T$, т. е. доля инфракрасного излучения, прошедшего сквозь образец без поглощения. Чем ниже значение T в определенной области спектра, тем интенсивнее поглощение, что указывает на присутствие соответствующих функциональных групп.

На спектре, представленном на рисунке 1, наблюдаются характерные полосы поглощения, каждая из которых соответствует определенным функциональным группам в составе исследуемого образца.

Широкий и выраженный максимум вблизи 3330 см^{-1} обусловлен валентными колебаниями гидроксильных связей (O–H). Такое поглощение типично для соединений с OH-группами – в первую очередь, воды, спиртов и фенолов. В случае сосновой муки основными носителями этих групп выступают целлюлоза и лигнин, входящие в состав клеточных стенок древесины.

Пик в области 1736 см^{-1} связан с колебаниями карбонильных групп (C=O), характерных для органических соединений, таких как карбоновые кислоты, кетоны, альдегиды или эфиры. Его присутствие может свидетельствовать о наличии окисленных структур или сложных эфиров в образце.

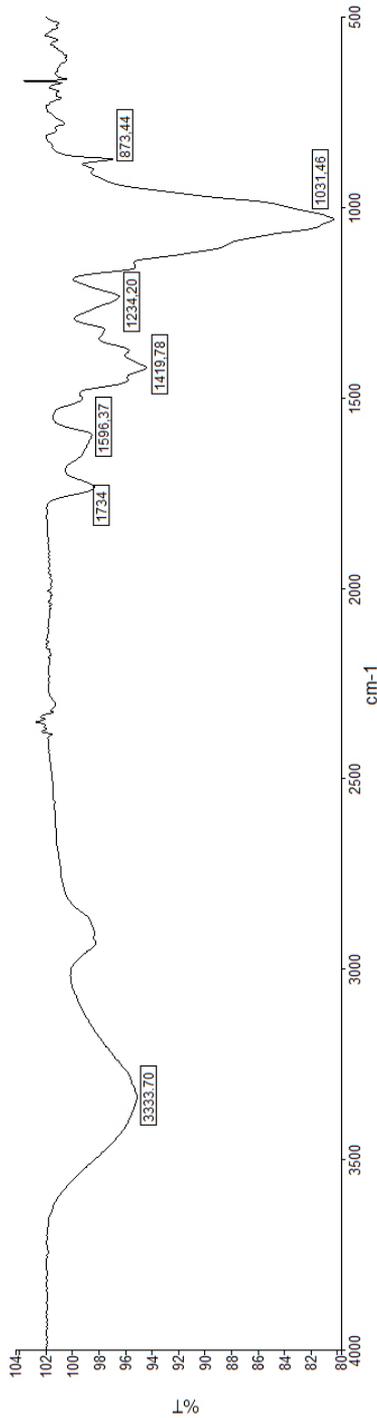
Полосы в диапазоне $1600\text{--}1500 \text{ см}^{-1}$, как правило, отражают колебания ароматических систем – в частности, бензольных колец, входящих в структуру лигнина. Эти сигналы являются маркерами ароматической компоненты биополимеров древесины.

Ярко выраженный пик около 1050 см^{-1} соответствует деформационным и валентным колебаниям связей C–O и C–O–H, которые преобладают в полисахаридах – прежде всего, в целлюлозе и гемицеллюлозе.

На рисунке 2 приведен ИК-спектр сосновой муки, прошедшей двухэтапную модификацию: сначала термическую обработку, затем озонирование. Сравнение спектров позволяет выявить изменения в химическом составе и структуре образца под влиянием этих воздействий.

На представленном ИК-спектре образца сосновой муки, подвергнутого двухступенчатой модификации, наблюдаются характерные изменения в интенсивности и положении полос поглощения, отражающие структурные и функциональные трансформации биополимеров древесины.

Пик при 3338 см^{-1} интерпретируется как валентные колебания гидроксильных групп O–H, локализованных в структуре целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина. Пик в области $\sim 1730 \text{ см}^{-1}$ соответствует валентным колебаниям карбонильных групп C=O, что может указывать на присутствие сложных эфиров, альдегидов или карбоновых кислот, образовавшихся, вероятно, в результате окислительных процессов при озонировании. Полосы при 1317 см^{-1} и 1233 см^{-1} обусловлены деформационными колебаниями связей C–H и C–O, характерных для углеводных и ароматических фрагментов. Пик при 1031 см^{-1} ассоциируется с валентными колебаниями эфирных связей C–O–C в полисахаридных цепях целлюлозы и гемицеллюлозы. Поглощение в области $\sim 601 \text{ см}^{-1}$ может быть связано с деформационными колебаниями ароматических или гетероциклических фрагментов.

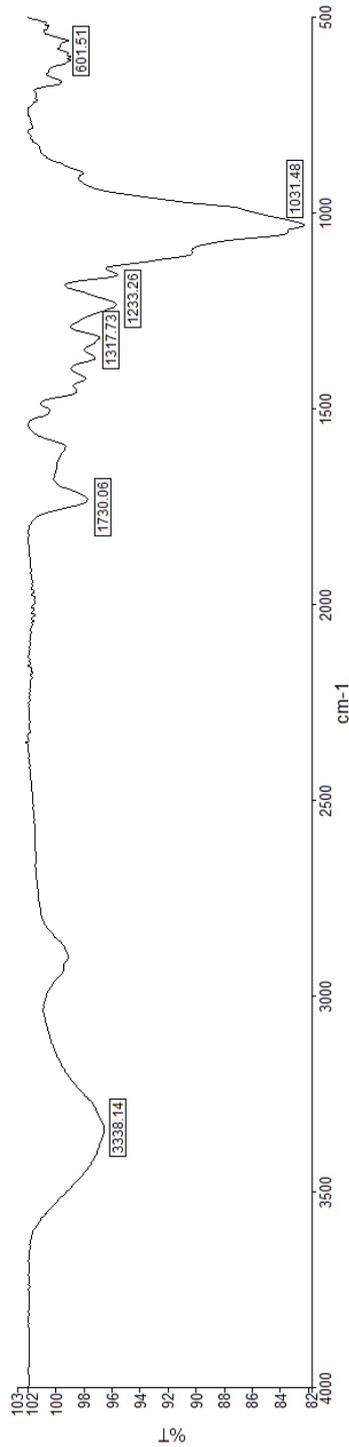


Р и с. 1. ИК-спектры пропускания контрольного образца

Fig. 1. Protocol for studying the IR transmission spectra of a control sample

Источник: рисунок 1 взят из [26].

Source: the figure 1 is taken from [26].



Р и с. 2. ИК-спектры пропускания озонированного и термически модифицированного образца

Fig. 2. Protocol for studying the IR transmission spectra of an ozonized and thermally modified sample

Источник: рисунок составлен авторами статьи.

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

Сравнительный анализ спектров контрольного (необработанного) и модифицированного образцов выявляет значительные различия в профиле поглощения. Спектр исходной древесной муки демонстрирует выраженные полосы, характерные для нативных биополимеров: интенсивный максимум при $3330,70 \text{ см}^{-1}$ отражает высокую концентрацию гидроксильных групп, присущих целлюлозе, гемицеллюлозе и лигнину. В ходе озонирования происходит окислительная деструкция органических структур, сопровождающаяся трансформацией гидроксильных и фенольных групп в карбонильные и карбоксильные функции.

У модифицированного образца наблюдается снижение интенсивности полос при $1596,37 \text{ см}^{-1}$ и $1419,78 \text{ см}^{-1}$. Поглощение при $1596,37 \text{ см}^{-1}$ связано с валентными колебаниями ароматических $\text{C}=\text{C}$ связей в лигнине; его ослабление свидетельствует о деструкции ароматических ядер под действием термической обработки и озонлиза. Пик при $1419,78 \text{ см}^{-1}$ отражает деформационные колебания $\text{C}-\text{H}$ и $\text{O}-\text{H}$, а также колебания $\text{C}-\text{OH}$ групп в углеводных компонентах. Снижение его интенсивности указывает на частичную деградацию целлюлозы и гемицеллюлозы, сопровождающуюся уменьшением концентрации гидроксильных и метиленовых групп, а также их окислением до карбонильных и карбоксильных производных.

Полоса при $1234,26 \text{ см}^{-1}$, характерная для $\text{C}-\text{O}$ в эфирных и спиртовых структурах полисахаридов, также демонстрирует снижение интенсивности, что согласуется с разрушением гемицеллюлозных и целлюлозных цепей при термическом воздействии. Пик при $873,44 \text{ см}^{-1}$, связанный с деформационными колебаниями в β -глюкозидных звеньях и метильных/метиленовых группах, ослабевает вследствие термоиндуцированного и озонлитического расщепления гликозидных связей $\text{C}-\text{O}-\text{C}$. Одновременно наблюдается усиление поглощения при $1317,73 \text{ см}^{-1}$ – вероятно, за счет накопления карбонильных групп, образующихся при окислении.

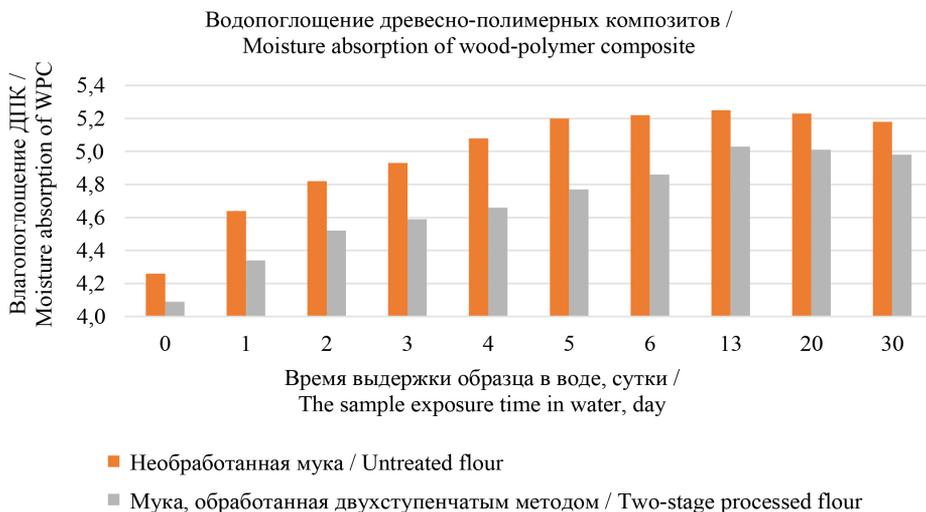
Рост интенсивности полосы при $601,51 \text{ см}^{-1}$ может быть обусловлен деформационными колебаниями в остаточных фенольных структурах лигнина, подвергшихся частичной модификации в ходе озонирования, что указывает на сохранение некоторых ароматических фрагментов, но в измененной, окисленной форме.

На рисунке 3 представлены данные по гигроскопичности ДПК на основе термопластичного крахмала, армированных двумя типами наполнителя: необработанной древесной мукой и мукой, прошедшей двухступенчатую модификацию. График отражает кинетику влагопоглощения, позволяя оценить влияние предварительной обработки наполнителя на гидрофильные свойства конечного материала.

Согласно результатам исследования, представленным на рисунке 3, масса контрольных образцов увеличивается с увеличением времени эксперимента. Композиционный материал с необработанным наполнителем в составе имеет максимальный показатель влагопоглощения из-за наличия открытых пор и гидрофильных групп в структуре древесины. Эти группы образуют водородные связи с молекулами воды, что приводит к значительному увеличению массы образца.

При проведении термической модификации происходит разрушение гемицеллюлозы и частичная деполимеризация лигнина, что снижает количество гидрофильных групп в структуре древесины. Воздействие температуры позволяет снизить гигроскопичность материала, в то время как вторая ступень обработки,

озонирование, воздействует на поверхность древесины, окисляя органические компоненты, такие как лигнин и экстрактивные вещества. Таким образом, двухступенчатая обработка обеспечивает наименьшее влагопоглощение благодаря комбинированному воздействию термической модификации, сопровождающейся снижением количества гидрофильных групп и озонирования, которое способствует устранению их остатков на поверхности.

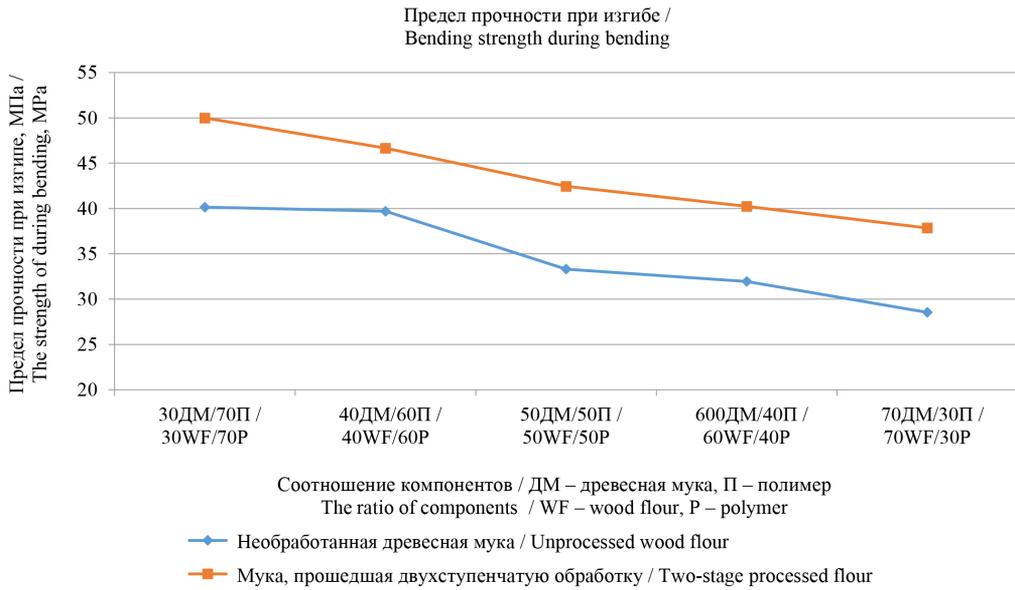


Р и с. 3. Определение влагопоглощения древесно-полимерных композитов
F i g. 3. Determination of water absorption of wood-polymer composites

Источник: графики для рисунков 3–5 составлены авторами статьи в программе *Microsoft Excel*.
Source: the graphs 3–5 are compiled by the authors of the article in the program *Microsoft Excel*.

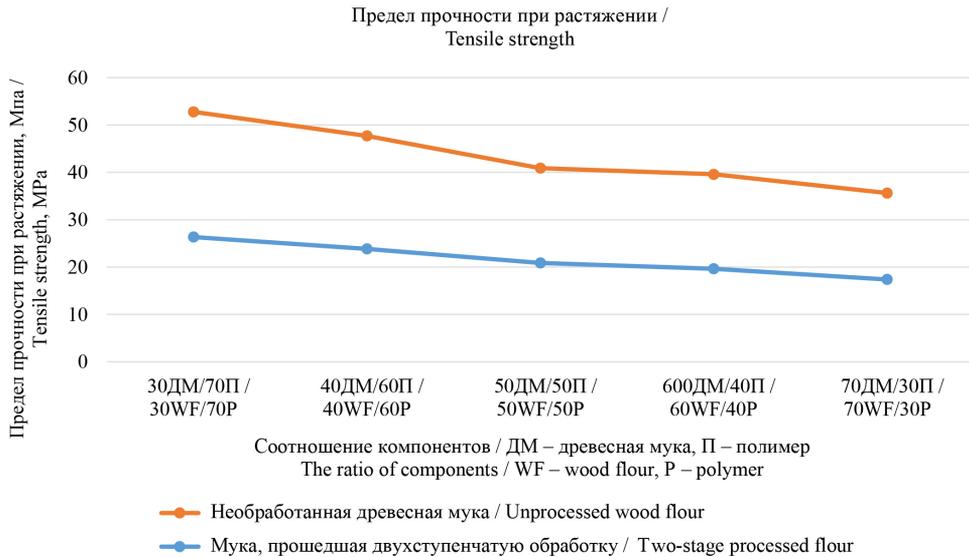
По результатам проведения исследования предела прочности при изгибе (рис. 4) для ДПК на основе термопластичного крахмала и двух видов муки установлено, что с увеличением содержания древесной муки в составе композита предел прочности постепенно снижается. Это связано с тем, что площадь контакта между частицами муки и матрицей увеличивается и приводит к формированию слабых границ раздела фаз. Двухступенчатая обработка муки способствует повышению показателя, максимальная прочность достигается при минимальном содержании муки в композите – 30 %. Так, термическая модификация увеличивает полярность муки, озонирование способствует окислению органических соединений с образованием функциональных групп, которые улучшают адгезию между компонентами смеси.

Анализируя данные, показанные на рисунке 5, можно утверждать, что образцы с мукой, прошедшей двухступенчатую обработку, демонстрируют наилучшие показатели предела прочности при растяжении. Это объясняется тем, что необработанная древесная мука имеет менее развитые межфазные связи с полимерной матрицей, что приводит к меньшей эффективности передачи нагрузки между компонентами.



Р и с. 4. Предел прочности древесно-полимерного композита при изгибе

F i g. 4. Bending strength of wood-polymer composite



Р и с. 5. Предел прочности древесно-полимерного композита при растяжении

F i g. 5. Tensile strength of wood-polymer composite

Установлена четкая корреляция между содержанием древесной муки в составе ДПК и его механическими свойствами: с увеличением массовой доли наполнителя наблюдается снижение предела прочности при растяжении для композитов

и с необработанной, и с модифицированной мукой. Однако степень снижения прочности существенно выше в системах с необработанным наполнителем, что указывает на недостаточную совместимость древесной муки с полимерной матрицей.

Предварительная термическая модификация способствует активации поверхности древесного наполнителя за счет частичной деструкции аморфных компонентов и экспонирования функциональных групп, что повышает его реакционную способность и улучшает межфазное взаимодействие с матрицей. Дополнительное озонирование индуцирует формирование на поверхности частиц новых кислородсодержащих функциональных групп (карбонильных, карбоксильных, гидроксильных), способных к образованию водородных и ковалентных связей с полимерной фазой. Данные процессы подтверждены спектроскопическими исследованиями (ИК-Фурье), выявившими характерные изменения в функциональном составе поверхности модифицированного наполнителя.

Экспериментальные данные демонстрируют значительное улучшение механических характеристик ДПК при использовании двухступенчато модифицированной древесной муки. В частности, предел прочности при растяжении увеличился на 17,89 %, а прочность при изгибе – на 15,6 % по сравнению с композитами на основе необработанной муки. Указанное улучшение механических свойств обусловлено оптимизацией адгезионного взаимодействия на границе «наполнитель – матрица». Термическая обработка повышает поверхностную полярность древесных частиц, способствуя более эффективному смачиванию и распределению в полимерной фазе. Озонирование, в свою очередь, обеспечивает химическую функционализацию поверхности, создавая дополнительные центры взаимодействия, которые способны участвовать в межмолекулярных и химических связях с компонентами матрицы. Совокупный эффект данных модификаций приводит к формированию более однородной и прочной композитной структуры.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено комплексное физико-химическое исследование ДПК на основе термопластичного крахмала, армированных двумя типами древесного наполнителя: необработанной древесной мукой и мукой, подвергнутой последовательной двухступенчатой модификации – термической обработке с последующим озонированием.

Представлен инновационный метод повышения совместимости древесного наполнителя с полимерной матрицей, основанный на комбинированном воздействии. На первом этапе, термической модификации, происходит селективная деструкция термолабильных компонентов древесины, в частности гемицеллюлозы и аморфных фрагментов лигнина, что сопровождается снижением концентрации гидрофильных функциональных групп и, как следствие, уменьшением гигроскопичности композита. На втором этапе, озонолитизе, реализуется поверхностная окислительная функционализация наполнителя, приводящая к образованию дополнительных карбонильных ($C=O$) и карбоксильных ($-COOH$) групп, способных к формированию межмолекулярных и химических связей с матрицей, что существенно усиливает межфазную адгезию.

Данные, полученные методом ИК-Фурье-спектроскопии, подтверждают структурные и функциональные трансформации, происходящие в древесной муке

в результате двухступенчатой обработки. Отмечено снижение интенсивности характерных полос поглощения, ассоциированных с ароматическими фрагментами лигнина и кристаллическими доменами целлюлозы, что свидетельствует о частичной деструкции данных компонентов. Одновременно фиксируется появление или усиление полос, соответствующих карбонильным и карбоксильным группам, что подтверждает успешную поверхностную окислительную модификацию. Совокупность этих изменений указывает на повышение реакционной способности и полярности поверхности наполнителя, что способствует более эффективному молекулярному взаимодействию с полимерной матрицей и, как следствие, улучшению механических и физико-химических свойств конечного композитного материала.

Одним из важнейших преимуществ двухступенчатой модификации является значительное снижение водопоглощения ДПК. По итогам 30-дневного испытания по ГОСТ 16483.19-72 водопоглощение композита с необработанной мукой составило 5,25 %, тогда как у композита с двухступенчато модифицированной мукой – 4,98 %, что соответствует снижению на 50 % в начальной фазе влагопоглощения и на 5,1 % по конечному значению. Это связано с разрушением гемицеллюлозы и лигнина, а также с окислением гидрофильных групп на поверхности древесины. Уменьшение содержания гидроксильных групп и увеличение доли карбонильных соединений снижают гидрофильность материала, что делает его более устойчивым к воздействию влаги. Снижение водопоглощения материала особенно важно при использовании композита в качестве материала для изготовления биоразлагаемых емкостей для посадки растений, где материал подвергается длительному контакту с водой.

Полученные результаты демонстрируют высокий потенциал двухступенчатой обработки древесной муки для создания качественных биокомпозитов с заданными свойствами. Модифицированный древесный наполнитель позволяет получить материал, сочетающий в себе высокие механические характеристики, устойчивость к воздействию воды и экологическую безопасность. Это открывает новые возможности применения ДПК в различных отраслях промышленности, таких как строительство, производство упаковочных материалов и сельское хозяйство.

Настоящее исследование вносит значительный вклад в развитие технологий создания биокомпозитов на основе древесной муки и термопластичного крахмала. Авторами предложен и экспериментально обоснован инновационный метод двухступенчатой модификации древесного наполнителя перед введением его в состав композиционного материала. Данный метод позволяет достичь оптимального баланса между механическими свойствами и устойчивостью к воздействию воды.

Наибольший прирост прочности при изгибе (15,6 %) и растяжении (17,89 %) достигнут при содержании модифицированного наполнителя 30 % от массы, что также сопровождалось минимальным водопоглощением – 4,98 % через 30 суток. Таким образом, данное исследование подтверждает целесообразность применения двухступенчатой модификации древесной муки для получения высококачественных биокомпозитов, обладающих уникальными физико-химическими и эксплуатационными свойствами. Результаты работы могут быть использованы для разработки новых экологически чистых материалов, что имеет важное значение для современного производства и решения экологических проблем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Esteves B., Pereira H. Wood Modification by Heat Treatment: A Review. *BioResources*. 2008;(4):370–404. <https://doi.org/10.15376/biores.4.1.370-404>
2. Safiullina A., Safin R., Mukhametzyanov S., Sabirova G., Shaikhutdinova A. Ozone Processing as a Method for Increasing Adhesional Properties of Wood. In: 20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference Proceedings SGEM: STEF92 Technology. 2020. <https://doi.org/10.5593/sgem2020/6.1/s26.053>
3. Аникеева К.Г., Сафин Р.Р. Влияние двухступенчатой обработки наполнителя на свойства древесно-полимерного композита. *Аграрный научный журнал*. 2024;(6):88–98. <https://doi.org/10.28983/asj.y2024i6pp88-98>
4. Eder A., Carus M. Global Trends in Wood-Plastic Composites. *Bioplastics Magazine*. 2014;(8):16–17. URL: https://www.researchgate.net/publication/284779431_Global_trends_in_wood-plastic_composites (дата обращения: 09.03.2025).
5. Аникеева К.Г., Кайнов П.А., Сафин Р.Р., Петров В.И. Влияние физико-химической модификации древесного наполнителя на механические свойства биоразлагаемого древесно-полимерного композита. *Деревообрабатывающая промышленность*. 2024;(3):62–67. URL: https://dop1952.ru/catalogue-statue_id-577.html (дата обращения: 15.04.2025).
6. Rabbi M.S., Islam T., Islam G.M.S. Injection-Molded Natural Fiber-Reinforced Polymer Composites – a Review. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*. 2021;16(15). <https://doi.org/10.1186/s40712-021-00139-1>
7. Akter M., Uddin M.H., Anik H.R. Plant Fiber-Reinforced Polymer Composites: a Review on Modification, Fabrication, Properties, and Applications. *Polymer Bulletin*. 2024;(81):1–85. <https://doi.org/10.1007/s00289-023-04733-5>
8. Khan S.H., Rahman Md.Z., Haque M.R., Hoque Md.E. Characterization and Comparative Evaluation of Structural, Chemical, Thermal, Mechanical, and Morphological Properties of Plant Fibers. *Annual Plant: Sources of Fibres, Nanocellulose and Cellulosic Derivatives*. 2023:1–45. https://doi.org/10.1007/978-981-99-2473-8_1
9. Li M., Pu Y., Thomas V.M., Yoo C.G., Ozcan S., Deng Y. и др. Recent Advancements of Plant-Based Natural Fiber – Reinforced Composites and Their Applications. *Composites Part B: Engineering*. 2020;(200). Article no. 108254. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108254>
10. Akter M., Uddin M.H., Tania I.S. Biocomposites Based on Natural Fibers and Polymers: a Review on Properties and Potential Applications. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2022;41(17–18):705–42. <https://doi.org/10.1177/07316844211070609>
11. More A.P. Flax Fiber-Based Polymer Composites: a Review. *Advanced Composites and Hybrid Materials*. 2022;(5):1–20. <https://doi.org/10.1007/s42114-021-00246-9>
12. Mahmud S., Hasan K.F., Jahid M.A., Mohiuddin K., Zhang R., Zhu J. Comprehensive Review on Plant Fiber-Reinforced Polymeric Biocomposites. *Journal of Materials Science*. 2021;(56):7231–7264. <https://doi.org/10.1007/s10853-021-05774-9>
13. Sathishkumar G.K., Ibrahim M., Mohamed A.M., Rajkumar G., Gopinath B., Karpagam R. и др. Synthesis and Mechanical Properties of Natural Fiber Reinforced Epoxy/Polyester/Polypropylene Composites: a Review. *Journal of Natural Fibers*. 2022;19(10):3718–3741. <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1848723>
14. Das P.P., Chaudhary V., Ahmad F., Manral A., Gupta S., Gupta P. Acoustic Performance of Natural Fiber Reinforced Polymer Composites: Influencing Factors, Future Scope, Challenges, and Applications. *Polymer Composites*. 2022;43(3):1221–1237. <https://doi.org/10.1002/pc.26455>
15. Laycock B., Pratt S., Halley P. A Perspective on Biodegradable Polymer Biocomposites – from Processing to Degradation. *Functional Composite Materials*. 2023;4(10). <https://doi.org/10.1186/s42252-023-00048-w>
16. Islam M.Z., Sarker M.E., Rahman M.M., Islam M.R., Ahmed A.F., Mahmud M.S. и др. Green Composites From Natural Fibers And Biopolymers: A Review on Processing, Properties,

- and Applications. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2022;41(13–14):526–557. <https://doi.org/10.1177/07316844211058708>
17. Kuram E. Advances in Development of Green Composites Based on Natural Fibers: a Review. *Emergent Materials*. 2022;(5):811–831. <https://doi.org/10.1007/s42247-021-00279-2>
 18. Andrew J.J., Dhakal H.N. Sustainable Biobased Composites for Advanced Applications: Recent Trends and Future Opportunities – a Critical Review. *Composites Part C: Open Access*. 2022;(7). Article no. 100220. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2021.100220>
 19. Чернышева А.В., Шкуро А.Е., Кривоногов П.С., Артемов А.В. Исследование возможности химической сшивки древесно-полимерных композитов. *Вестник Технологического университета*. 2019;22(8):99–101. <https://www.elibrary.ru/xssoeb>
 20. Anikeeva K.G., Safin R.R. Evaluation of Properties of Biodegradable Wood-Polymer Composite Based on Ozonized Wood Filler And Polyhydroxybutyrate for Application in Agricultural Industry. *E3S Web of Conferences*. 2024;539. Article no. 02031. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202453902031>

REFERENCES

1. Esteves B., Pereira H. Wood Modification by Heat Treatment: A Review. *BioResources*. 2008;(4):370–404. <https://doi.org/10.15376/biores.4.1.370-404>
2. Safullina A., Safin R., Mukhametzhanov S., Sabirova G., Shaikhutdinova A. Ozone Processing as a Method for Increasing Adhesive Properties of Wood. In: 20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference Proceedings SGEM: STEF92 Technology. 2020. <https://doi.org/10.5593/sgem2020/6.1/s26.053>
3. Anikeeva K.G., Safin R.R. The Effect of Two-Stage Filler Processing on the Properties of a Wood-Polymer Composite. *Agrarian Scientific Journal*. 2024;(6):88–98. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.28983/asj.y2024i6pp88-98>
4. Eder A., Carus M. Global Trends in Wood-Plastic Composites. *Bioplastics Magazine*. 2014;(8):16–17. Available at: https://www.researchgate.net/publication/284779431_Global_trends_in_wood-plastic_composites (accessed 09.03.2025).
5. Anikeeva K.G., Kainov P.A., Safin R.R., Petrov V.I. Effect of Physico-Chemical Modification of Wood Filler on the Mechanical Properties of Biodegradable Wood-Polymer Composite. *Derevoobrabativalnaya promishlennost*. 2024;(3):62–67. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: https://dop1952.ru/catalogue-statue_id-577.html (accessed 15.04.2025).
6. Rabbi M.S., Islam T., Islam G.M.S. Injection-Molded Natural Fiber-Reinforced Polymer Composites – a Review. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*. 2021;16(15). <https://doi.org/10.1186/s40712-021-00139-1>
7. Akter M., Uddin M.H., Anik H.R. Plant Fiber-Reinforced Polymer Composites: a Review on Modification, Fabrication, Properties, and Applications. *Polymer Bulletin*. 2024;(81):1–85. <https://doi.org/10.1007/s00289-023-04733-5>
8. Khan S.H., Rahman Md.Z., Haque M.R., Hoque Md.E. Characterization and Comparative Evaluation of Structural, Chemical, Thermal, Mechanical, and Morphological Properties of Plant Fibers. *Annual Plant: Sources of Fibres, Nanocellulose and Cellulosic Derivatives*. 2023:1–45. https://doi.org/10.1007/978-981-99-2473-8_1
9. Li M., Pu Y., Thomas V.M., Yoo C.G., Ozcan S., Deng Y., et al. Recent Advancements of Plant-Based Natural Fiber – Reinforced Composites and Their Applications. *Composites Part B: Engineering*. 2020;(200). Article no. 108254. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108254>
10. Akter M., Uddin M.H., Tania I.S. Biocomposites Based on Natural Fibers and Polymers: a Review on Properties and Potential Applications. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2022;41(17–18):705–42. <https://doi.org/10.1177/07316844211070609>
11. More A.P. Flax Fiber–Based Polymer Composites: a Review. *Advanced Composites and Hybrid Materials*. 2022;(5):1–20. <https://doi.org/10.1007/s42114-021-00246-9>
12. Mahmud S., Hasan K.F., Jahid M.A., Mohiuddin K., Zhang R., Zhu J. Comprehensive Review on Plant Fiber-Reinforced Polymeric Biocomposites. *Journal of Materials Science*. 2021;(56):7231–7264. <https://doi.org/10.1007/s10853-021-05774-9>

13. Sathishkumar G.K., Ibrahim M., Mohamed A.M., Rajkumar G., Gopinath B., Karpagam R., et al. Synthesis and Mechanical Properties of Natural Fiber Reinforced Epoxy/Polyester/Polypropylene Composites: a Review. *Journal of Natural Fibers*. 2022;19(10):3718–3741. <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1848723>
14. Das P.P., Chaudhary V., Ahmad F., Manral A., Gupta S., Gupta P. Acoustic Performance of Natural Fiber Reinforced Polymer Composites: Influencing Factors, Future Scope, Challenges, and Applications. *Polymer Composites*. 2022;43(3):1221–1237. <https://doi.org/10.1002/pc.26455>
15. Laycock B., Pratt S., Halley P. A Perspective on Biodegradable Polymer Biocomposites – from Processing to Degradation. *Functional Composite Materials*. 2023;4(10). <https://doi.org/10.1186/s42252-023-00048-w>
16. Islam M.Z., Sarker M.E., Rahman M.M., Islam M.R., Ahmed A.F., Mahmud M.S., et al. Green Composites From Natural Fibers And Biopolymers: A Review on Processing, Properties, and Applications. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2022;41(13–14):526–557. <https://doi.org/10.1177/07316844211058708>
17. Kuram E. Advances in Development of Green Composites Based on Natural Fibers: a Review. *Emergent Materials*. 2022;(5):811–831. <https://doi.org/10.1007/s42247-021-00279-2>
18. Andrew J.J., Dhakal H.N. Sustainable Biobased Composites for Advanced Applications: Recent Trends and Future Opportunities – a Critical Review. *Composites Part C: Open Access*. 2022;(7). Article no. 100220. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2021.100220>
19. Chernysheva A.V., Shkuro A.E., Krivonogov P.S., Artyomov A.V. Investigating the Possibility to Chemically Cross-Link Wood-Polymer Composites. *Herald of Technological University*. 2019;22(8):99–101. (In Russ., abstract in Eng.) <https://www.elibrary.ru/xssoeb>
20. Anikeeva K.G., Safin R.R. Evaluation of Properties of Biodegradable Wood-Polymer Composite Based on Ozonized Wood Filler And Polyhydroxybutyrate for Application in Agricultural Industry. *E3S Web of Conferences*. 2024;539. Article no. 02031. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202453902031>

Об авторах:

Аникеева Ксения Геннадьевна, аспирант, ассистент кафедры архитектуры и дизайна изделий из древесины Казанского национального исследовательского технологического университета (420015, Российская Федерация, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Карла Маркса, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5128-0946>, Scopus ID: 59187925100, Researcher ID: NRB-5416-2025, doomksen@mail.ru

Сафин Руслан Рушанович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой архитектуры и дизайна изделий из древесины Казанского национального исследовательского технологического университета, (420015, Российская Федерация, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Карла Маркса, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0226-4232>, Scopus ID: 7003561160, Researcher ID: O-9355-2015, cfaby@mail.ru

Вклад авторов:

К. Г. Аникеева – применение статистических, математических, вычислительных или других формальных методов для анализа или синтеза данных исследования, осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов или сбор данных, критический анализ полученных результатов.

Р. Р. Сафин – контроль, лидерство и наставничество в процессе планирования и проведения исследования, формулирование замысла, идеи исследования, целей и задач.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила в редакцию 29.09.2025; поступила после рецензирования 06.11.2025; принята к публикации 16.12.2025

About the authors:

Ksenia G. Anikeeva, Post-Graduate Student, assistant of the Department of Architecture and Design of Wood Products, Kazan National Research Technological University (68 Karl Marx St., Kazan 420015, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5128-0946>, Scopus ID: 59187925100, Researcher ID: NRB-5416-2025, doomksen@mail.ru

Ruslan R. Safin, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Architecture and Design of Wood Products, Kazan National Research Technological University (68 Karl Marx St., Kazan 420015, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0226-4232>, Scopus ID: 7003561160, Researcher ID: O-9355-2015, cfaby@mail.ru

Authors contribution:

K. G. Anikeeva – applying statistical, mathematical, computational or other formal techniques to analyze or synthesize the study data, conducting studies, specifically carrying experiments and collecting data; critical analysis of the obtained results.

R. R. Safin – control, leadership and mentoring in the process of planning and conducting the study; formulating the idea, aims and objectives of the study.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 29.09.2025; revised 06.11.2025; accepted 16.12.2025

Информация для авторов и читателей

Научный журнал «Инженерные технологии и системы» публикует оригинальные научные исследования, способствующие развитию науки в области инженерных систем и технологий.

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

1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики (технические науки)

1.3.6. Оптика (технические науки)

1.3.13. Электрофизика, электрофизические установки (технические науки)

2.5.3. Трение и износ в машинах (технические науки)

4.1.4. Садоводство, овощеводство, виноградарство и лекарственные культуры (технические науки)

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки)

4.3.2. Электротехнологии, электрооборудование и энергоснабжение агропромышленного комплекса (технические науки)

Журнал приветствует статьи, имеющие потенциально высокий импакт-фактор и/или содержащие материал о значительных достижениях в указанных направлениях. Особое внимание следует уделить качеству перевода. Желательно, чтобы он был выполнен носителем английского языка.

Не допускается направление в редакцию уже опубликованных статей или статей, отправленных на публикацию в другие журналы. **В случае обнаружения одновременной подачи рукописи в несколько изданий опубликованная статья будет ретрагирована (отозвана из печати).** Мониторинг несанкционированного цитирования осуществляется с помощью систем «Антиплагиат» и «iThenticate».

При подготовке статьи к публикации в журнале «Инженерные технологии и системы» необходимо учесть следующие пункты:

1. Указать УДК.

2. **Заголовок статьи** должен кратко и точно отражать содержание статьи, тематику и результаты проведенного исследования. *Приводится на русском и английском языках.*

3. **Аннотация** (200–250 слов) выполняет функцию расширенного названия статьи и повествует о ее содержании. В ней должны быть четко обозначены следующие составные части:

1) Введение (Introduction);

2) Цель статьи (Aim of the Article);

3) Материалы и методы (Materials and Methods);

4) Результаты исследования (Results);

5) Обсуждение и заключение (Discussion and Conclusion).

Приводится на русском и английском языках.

4. **Ключевые слова** (5–10) являются поисковым образом научной статьи. В связи с этим они должны отражать основные положения, достижения, результаты, терминологию научного исследования. *Приводятся на русском и английском языках.*

5. **Благодарности.** В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам. *Приводятся на русском и английском языках.*

6. **Основной текст** статьи излагается на русском или английском языках.

1) Введение – постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности.

2) Обзор литературы. Необходимо описать основные (последние по времени) исследования и публикации, на которые опирается автор; современные взгляды на проблему; трудности при разработке данной темы; выделить нерешенные вопросы в пределах общей проблемы, которым посвящена статья.

3) Материалы и методы. В данном разделе описываются процесс организации эксперимента, примененные методики, использованная аппаратура; даются подробные сведения об объекте исследования; указывается последовательность выполнения исследования и обосновывается выбор используемых методов (наблюдение, опрос, тестирование, эксперимент, лабораторный опыт и т. д.).

4) Результаты исследования. Это основной раздел, цель которого – при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки сделанных выводов. Также должно быть обосновано, почему для анализа были выбраны именно эти данные.

5) Обсуждение и заключение. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области.

7. **Список литературы** (оформляется в соответствии с требованиями Ванкуверского стиля). Ссылаться нужно в первую очередь на оригинальные источники из научных журналов, включенных в глобальные индексы цитирования. Следует указать DOI или адрес доступа в сети Интернет. *Оформляется на русском и английском языках.*

8. **Об авторах.** Ф.И.О., организация(и), адрес организации(й) (требуется указать все места работы автора, в которых выполнялись исследования (постоянное место, место выполнения проекта и др.)), должность и ученое звание, ORCID, Researcher ID, электронная почта, телефон, почтовый адрес для отправки авторского экземпляра. *Приводится на русском и английском языках.*

9. **Заявленный вклад авторов.** Для формулировки фактического вклада каждого соавтора в выполненную работу необходимо использовать таксономию CRediT (Contributor Roles Taxonomy) – стандарт, разработанный Национальной организацией по информационным стандартам (National Information Standards Organization, NISO) (<https://credit.niso.org/>). Порядок указания авторов и соавторов статьи согласуется ими самостоятельно. *Приводится на русском и английском языках.*

10. Техническое оформление.

1) Редакция принимает тексты, сохраненные в формате .doc, .docx, .rtf. Желательно использовать шрифт Times New Roman, кегль 14 и интервал 1,5 строки. Расстановка переносов вручную не допускается. Запрещается использовать двойные пробелы в тексте, а также выполнять отступы (красная строка), используя пробелы.

2) Формулы набираются сочетанием основного шрифта и шрифта Symbol (исключение для дробей, сумм, квадратного корня) в Microsoft Equation 3.0 (Редактор формул в Microsoft Word) или Math Type 6. Латинские знаки в формулах и обозначениях (как в тексте, так и на рисунках) набираются курсивом. Формулы нумеруются в круглых скобках. Нумеровать следует только те формулы и уравнения, на которые есть ссылка в последующем изложении.

3) Все названия, подписи и структурные элементы графиков, таблиц, схем и т. д. оформляются на русском и английском языках.

4) Рисунки могут быть представлены в растровом или векторном формате с разрешением не ниже 300 dpi. Они должны допускать редактирование текста и возможность изменения размеров. Все графические данные помещаются в текст статьи, а также высылаются дополнительно в виде отдельных файлов. Разнохарактерные иллюстрации необходимо приводить к единому стилю графического исполнения, соблюдая единообразие их оформления. Графики, схемы и диаграммы необходимо оформлять в *Microsoft Excel*.

При подаче статьи в редакцию автор соглашается с положениями прилагаемого лицензионного договора.

Важным этапом в процессе отбора статьи является рецензирование. В журнале «Инженерные технологии и системы» принято «двойное слепое» (рецензент и автор не знают имен друг друга) рецензирование статей. Рецензент на основании анализа статьи принимает решение о рекомендации ее к публикации или о ее отклонении. В случае несогласия автора статьи с замечаниями рецензента его мотивированное заявление рассматривается редакционной коллегией.

Политика редакционной коллегии журнала базируется на современных юридических требованиях в отношении клеветы, авторского права, законности и плагиата, поддерживает Кодекс этики научных публикаций, сформулированный Комитетом по этике научных публикаций, и строится с учетом этических норм работы редакторов и издателей, закрепленных в Кодексе поведения и руководящих принципах наилучшей практики для редактора журнала и Кодексе поведения для издателя журнала, разработанных Комитетом по публикационной этике (COPE).

«Инженерные технологии и системы» – журнал открытого доступа, то есть все содержание находится в свободном доступе бесплатно для пользователя в соответствии с определением BOAI открытого доступа. Материалы журнала доступны по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная.

Журнал распространяется по подписке, заявкам высших учебных заведений, учреждений образования и отдельных лиц. Подписной индекс – 70539.

Сенин Петр Васильевич – главный редактор. Тел.: +7 (8342) 23-32-60.

Левцев Алексей Павлович – заместитель главного редактора. Тел.: +7 (8342) 25-41-01.

Чаткин Михаил Николаевич – заместитель главного редактора. Тел.: +7 (8342) 25-44-20.

Гордина Екатерина Павловна – ответственный секретарь. Тел.: +7 (8342) 48-14-24.

Information for authors and readers of the journal

Engineering Technologies and Systems journal accepts unpublished earlier original research results promoting the development of science in the field of engineering systems and technologies.

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

Instruments and Methods of Experimental Physics

Optics

Electrophysics, Electrophysical Installations

Friction and Wear in Machines

Gardening, Olericulture, Viticulture and Medicinal Plants

Technologies, Machinery and Equipment for Agroindustrial Complex

Electrotechnologies, Electrical Equipment and Power Supply of Agroindustrial Complex

The journal gives preference to the articles with potentially high impact factor and/or containing materials about significant achievements in the specified areas of science. Special attention should be paid to the quality of the translation. Preferably it should be made by a native English speaker.

It is not allowed to submit papers that have already been published or sent for publication to other journals. **In the case of multiple submission of a manuscript, the published article will be retracted.** Monitoring of unauthorized citation is implemented by means of Antiplagiati and iThenticate systems.

To submit an article in the journal *Engineering Technologies and Systems* you should know:

1. It is necessary to indicate the **Universal Decimal Classification (UDC)** code.

2. **The title of the article** should accurately reflect the content of the article, the subject matter and the results of the research conducted.

The title should be written in Russian and English.

3. **The abstract** (200–250 words) serves as an enhanced title of the article and briefly presents its content. The abstract consists of the following components:

1) Introduction;

2) Aim of the Article;

3) Materials and Methods;

4) Results;

5) Discussion and Conclusion.

The abstract should be written in Russian and English.

4. **Keywords** (5–10) make the search profile of the scientific article. In this regard, they should reflect the main provisions, achievements, results and terminology of the scientific research.

Keywords should be written in Russian and English.

5. **Acknowledgements.** In this section the author may mention the people who helped them to prepare the article or the organizations that provided financial support. It is considered good style to express gratitude to anonymous reviewers.

Acknowledgements should be written in Russian and English.

6. **The main body** of the article should be written in Russian or in English.

1) **Introduction.** It contains formulation of the scientific problem, its relevance, connection with the most important tasks to be solved, the importance for the development of a particular area of science or practical activities.

2) **Literature Review.** It is necessary to describe the main (recent) pieces of research and publications relied upon by the author, modern views on the problem, difficulties in solving the problem as well as to highlight the unresolved issues within the general problem of the article.

3) **Materials and Methods.** This section describes the process of designing the experiment, the methods and equipment used; it gives detailed information about the subject and sequence of the research, justifies the choice of the methods used (observation, survey, testing, experiment, etc.).

4) **Results.** This is the main section, the purpose of which is to prove the working hypothesis (hypotheses) by analyzing, generalizing and explaining the data. The results should be brief, but they should provide sufficient information to evaluate the conclusions drawn. It should also be justified why the particular data were chosen for the analysis.

5) Discussion and Conclusion. In conclusion, the results of understanding the topic should be summarized; conclusions, generalizations and recommendations arising from the work should be made, their practical significance should be emphasized and the main directions for further research in the studied area should be determined.

7. **References** should be formatted in accordance with the requirements of the Vancouver Style. The original sources from scientific journals included in the global citation indices should be cited first of all. DOI or the URL of the source should be indicated.

References should be written in Russian and English.

8. Information **about the author(s)** includes: the author's first name and last name, the name of the institution and its address (it is required to specify all the institutions where the author works and where the research was conducted (permanent place of work, the place where the project was done, etc.)). The author's position and academic title, ORCID, Researcher ID, e-mail, phone number, postal address for sending a personal copy of the journal issue.

Information about the authors should be written in Russian and English.

9. **Authors contribution.** To formulate the actual contribution of each co-author to the work performed, it is necessary to use the taxonomy CRediT (Contributor Roles Taxonomy), a standard developed by the National Information Standards Organization (NISO) (<https://credit.niso.org/>). The order of indication of authors and co-authors of the article is agreed by them independently.

Contribution of the authors should be written in Russian and English.

10. **Manuscript Format Guidelines.**

1) The manuscript should be typed in the Microsoft Word text processing program for Windows (.doc, .docx, .rtf): sheet size – A4, Times New Roman font, font size – 14, line spacing – 1.5. Manual hyphenation is not allowed. It is forbidden to use double spaces in the text, as well as to indent (red line) using spaces.

2) Formulas are typed by combining the main font and the Symbol font (exception for fractions, sums, square root) in Microsoft Equation 3.0 (Formula Editor in Microsoft Word) or Math Type 6. Latin symbols in formulas and notation (both in the text and in the figures) typed in italics. Formulas are numbered in parentheses. Only those formulas and equations referenced in the following presentation should be numbered.

3) All titles, signatures and structural elements of graphs, tables, charts, etc., are to be provided in Russian and English.

4) Figures can be presented in raster or vector format with a resolution of at least 300 dpi. They should allow text editing and resizability. All graphic data are placed in the text of the article, as well as sent additionally as separate files. Diverse illustrations should be brought to a single style of graphic performance, while respecting the uniformity of their design. Graphs, charts and diagrams must be drawn up in Microsoft Excel.

When submitting an article to the journal, the author agrees with the provisions of the attached license agreement.

As part of the submission, the journal will peer review your article before deciding whether to publish it. *Engineering Technologies and Systems* journal uses double-blind review, which means that both the reviewer and author identities are concealed from the reviewers, and vice versa. On the basis of the analysis of the article, the reviewer makes a decision whether to recommend the article for publication or reject it. If the author disagrees with the reviewer's comments, their reasoned statement shall be considered by the Editorial Board.

Editorial staff's policy is based on modern legal requirements concerning libel, copyright, legitimacy, plagiarism, ethical principles, kept in community of leading scientific issues publishers. Journal's editorial policy is based upon traditional ethical principles of Russian academic periodicals; it supports Academic Periodicals Ethical Codex, stated by Committee on Publication Ethics (Russia, Moscow) and it is formed in account of standards of ethics of editors' and publishers' work confirmed by Code of Conduct and Best Practice Guidelines for Journal Editors and Code of Conduct for Journal Publishers, developed by Committee on Publication Ethics (COPE).

Engineering Technologies and Systems is an open access journal, which means that all content is freely available without charge to the user or his/her institution. Users are allowed to read, download, copy, distribute, print, search, or link to the full texts of the articles, or use them for any other lawful purpose, without asking prior permission from the publisher or the author in accordance with the BOAI definition of open access. All the materials of the journal are made available under a Creative Commons "Attribution" 4.0 license.

The journal is distributed on the basis of a subscription, requests of higher education institutions, educational institutions and individuals. The subscription index is 70539.

Petr V. Senin – Editor-in-Chief. Tel.: +7 (8342) 233260.

Alexey P. Levtshev – 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. А. Климкиной*
Информационная поддержка *Р. В. Карасева*

Территория распространения – Российская Федерация, зарубежные страны.

Подписано в печать 20.03.2026 г. Дата выхода в свет 30.03.2026 г.

Формат $70 \times 100 \frac{1}{16}$. Усл. печ. л. 18,53.

Тираж 1 000 экз. 1 завод – 100 экз. Заказ № 145. 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. A. Klimkina*
Informational support *R. V. Karasev*

Distributed in Russian Federation and foreign countries.
Signed to print 20.03.2026. Date of publishing 30.03.2026.
Sheet size $70 \times 100 \frac{1}{16}$. Conventional printed sheets 18.53.
Number of copies 1 000. 1st edition – 100 copies. Order no. 145. Free price.

Address of Printing Office: 24 Sovetskaya St., Saransk 430005, Republic of Mordovia, Russian Federation
(Publishing Office of National Reserch Mordovia State University)

**Редакция научных журналов Высшей школы развития
научно-образовательного потенциала МГУ им. Н. П. Огарёва
представлена следующими изданиями**



**ИНТЕГРАЦИЯ
ОБРАЗОВАНИЯ**



**ИНЖЕНЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
И СИСТЕМЫ**



РЕГИОНОЛОГИЯ



ФИННО-УГОРСКИЙ МИР



**МЕДИЦИНА
И БИОТЕХНОЛОГИИ**



БАХТИНСКИЙ ВЕСТНИК



ОГАРЁВ-ONLINE

