

doi: 10.15507/2658-4123.035.202501

ISSN 2658-4123 (Print), 2658-6525 (Online)

**Том 35, № 1. 2025**

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

16+



**Vol. 35, no. 1. 2025**

SCIENTIFIC JOURNAL  
Founded in January 1990  
Periodicity:  
Quarterly

# ИНЖЕНЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ ENGINEERING TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

doi: 10.15507/2658-4123

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

Главный редактор П. В. Сенин

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

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

Editor-in-Chief P. V. Senin

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

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

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

Является членом Directory of Open Access Journals (DOAJ),  
Open Access Scholarly Publishers Association (OASPA),  
Committee on Publication Ethics (COPE),

Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ) и CrossRef

Зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи,  
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор),  
реестровая запись ПИ № ФС77-74640 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 House address:**  
68/1 Bolshevistskaya St., Saransk 430005,  
Republic of Mordovia,  
Russian Federation  
Tel/Fax: +7 8342 481424

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

## Инженерные технологии и системы

рецензируемый научный журнал открытого доступа

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

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

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

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

Распространение – Российская Федерация, зарубежные страны.

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

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

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

Журнал индексируется и архивируется в базах данных:

Web of Science Core Collection (ESCI)

Russian Science Citation Index (RSCI)

Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)

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

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



## Engineering Technologies and Systems

A peer-reviewed open access academic journal

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

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

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

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

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

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

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

Instruments and Methods of Experimental Physics

Optics

Electrophysics, Electrophysical Installations

Friction and Wear in Machines

Gardening, Olericulture, Viticulture and Medicinal Plants

Technologies, Machinery and Equipment for Agroindustrial Complex

Electrotechnologies, Electrical Equipment and Power Supply of Agroindustrial Complex

The journal is indexed and archived by databases:

Web of Science Core Collection (ESCI)

Russian Science Citation Index (RSCI)

Russian Index of Science Citation

The journal is a member of Open Access Scholarly Publishers Association (OASPA),

Directory of Open Access Journals (DOAJ), Committee on Publication

Ethics (COPE), Association of Scientific Editors and Publishers (ASEP), CrossRef

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



## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

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

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

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

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

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

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

**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)

**Истоминна 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 МИЭА – Российского технологического университета, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6992-455X> (Москва, Российская Федерация)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Тарасов Евгений Михайлович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации, 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. Gorbатов Federal Research Center of Food Systems, Russian Academy of Sciences, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3573-930X> (Moscow, Russian Federation)

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

**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 Ruzavka Institute of Mechanical Engineering, National Research Mordovia State University (Saransk, Russian Federation)

- Alexander V. Kotin** – Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Mechanization of Agricultural Production Processing, National Research Mordovia State University, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8235-0052> (Saransk, Russian Federation)
- Oleg N. Kukharev** – Dr.Sci. (Eng.), Professor, Rector of Penza State Agrarian University, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3519-4066> (Penza, Russian Federation)
- Fedor V. Kusmartsev** – Ph.D., Head of the Physics Department, Loughborough University (Loughborough, Great Britain); Professor of the College of Arts and Sciences, Khalifa University (Abu Dhabi, UAE)
- Yakov P. Lobachevskiy** – Dr.Sci. (Eng.), Professor, First Deputy Director, Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Academician-Secretary of the Department of Agricultural Sciences of RAS, Academician of RAS, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7863-2962> (Moscow, Russian Federation)
- Svetlana A. Mikayeva** – Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Chair of Electronics, MIREA – Russian Technological University, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6992-455X> (Moscow, Russian Federation)
- Andrey Yu. Nesmiyan** – Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Deputy Director for Research and Innovation, Azov-Black Sea Engineering Institute of Don State Agrarian University, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5556-1767> (Zernograd, Russian Federation)
- Valeriy V. Ostrikov** – Dr.Sci. (Eng.), Professor, Director of the All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2927-768X> (Tambov, Russian Federation)
- Sergey A. Plotnikov** – Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Mechanical Engineering Technology, Vyatka State University, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8887-4591> (Kirov, Russian Federation)
- Yuriy N. Prytkov** – Dr.Sci. (Agric.), Professor of the Prof. S. A. Lapshin Chair of Zootechnics, National Research Mordovia State University (Saransk, Russian Federation)
- Feliks Ya. Rudik** – Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Technologies of Food Products, Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N. I. Vavilov, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8444-0115> (Saratov, Russian Federation)
- Polina A. Ryabochkina** – Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor, Chief Scientific Officer of the Laboratory of Optical Spectroscopy of Laser Materials, National Research Mordovia State University, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8503-8486> (Saransk, Russian Federation)
- Abdel-Badeeh M. Salem** – Dr.Sci. (CS), Professor Emeritus, Head of Artificial Intelligence and Knowledge Engineering Research Labs, Professor of the Faculty of Computer and Information Sciences, Ain Shams University, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0268-6539> (Cairo, Egypt)
- Tamara I. Shishelova** – Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Physics, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russian Federation)
- Arkadii A. Simdiankin** – Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Technical Biomechanics and Natural Science Subjects, Russian University of Sport (GTSOLIFK), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9761-6183> (Moscow, Russian Federation)
- Vladimir A. Skryabin** – Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Technology and Equipment in Mechanical Engineering, Penza State University, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7156-9198> (Penza, Russian Federation)
- Evgeniy M. Tarasov** – Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Automatics, Telemechanics and Communication on Railway Transport, Samara State Transport University, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2717-7343> (Samara, Russian Federation)
- Sergey Yu. Zhachkin** – Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Operation of Transport and Technological Machines, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter I, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1844-5011> (Voronezh, Russian Federation)
- Olga Ye. Zheleznikova** – Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, Director of the Institute of Electronics and Light Engineering, National Research Mordovia State University (Saransk, Russian Federation)

## **СОДЕРЖАНИЕ**

### **РЕДАКЦИОННАЯ СТАТЬЯ**

- Сенин П. В.** На границе прошлого с грядущим.  
Журнал «Инженерные технологии и системы» отмечает 35-летие! ..... 10

### **ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ**

- Димитров В. П., Нурутдинова И. Н., Борисова Л. В., Папченко А. А.**  
Технология настройки рабочих органов роторного комбайна на основе нечеткого моделирования (на англ. яз.) ..... 13
- Сторчевой В. Ф., Белов М. И., Сторчевой А. В., Уманский П. М.**  
Обоснование параметров активирования воды в электроактиваторе для полива растений ..... 30
- Левцев А. П., Лапин Е. С., Лысяков И. И., Чжень Д.** Теплопередача  
однотрубной системы отопления при реверсивной подаче теплоносителя ..... 49

### **ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ**

- Савиных П. А., Турубанов Н. В., Алешкин А. В., Сухляев В. А.**  
Влияние давления воздуха на технологический процесс измельчения зерна в дробилке ..... 60
- Красовский В. В., Гербер Ю. Б.** Экспериментальное исследование  
и оптимизация скорости резания для повышения эффективности малогабаритного  
дискового измельчителя растительных остатков ..... 84
- Кравченко Л. В., Кравченко В. А., Журба В. В., Меликов И. М.**  
Агротехническая проходимость зерноуборочных комбайнов с комплектацией ведущих  
колес разными шинами ..... 101
- Кулиев З. В., Якубов К. Г., Алиев Э. М.** Оптимизация параметров  
универсальной установки для измельчения кормов ..... 121
- Курдюмов В. И., Исаев Ю. М., Павлушин А. А., Горельшев Е. М.**  
Обоснование конструктивных параметров очистителя корнеплодов от почвы ..... 139

### **ТРЕНИЕ И ИЗНОС В МАШИНАХ**

- Кравченко И. Н., Феськов С. А., Сенин П. В., Чумаков П. В., Гуцан А. А.**  
Применение эпоксидно-гравийных композитов для упрочнения составных лемехов  
с возможностью устранения лучевидного износа ..... 155
- Информация для авторов и читателей* ..... 170

## ***CONTENTS***

### ***EDITORIAL***

<b>Senin P. V.</b> On the Border Between the Past and Future. The Journal “Engineering Technologies and Systems” Celebrates its 35 <sup>th</sup> Anniversary! .....	10
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

### ***ELECTRICAL TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT***

<b>Dimitrov V. P., Nurutdinova I. N., Borisova L. V., Papchenko A. A.</b>	
Technology for Adjusting Working Tools of a Rotary Harvester Based on Fuzzy Modelling .....	13
<b>Storchevoy V. F., Belov M. I., Storchevoy A. V., Umansky P. M.</b> Substantiation of the Parameters of Water Activation in an Electroactivator for Watering Plants .....	
	30
<b>Levtsev A. P., Lapin E. S., Lysyakov I. I., Chen D.</b> Investigation of Reversible Heat Transfer in a One-Pipe Heating System .....	
	49

### ***TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT***

<b>Savinykh P. A., Turubanov N. V., Aleshkin A. V., Suhlyayev V. A.</b> The Effect of Air Pressure on the Technological Process of Grinding in the Grain Hammer Mill .....	
	60
<b>Krasovskiy V. V., Gerber Y. B.</b> Experimental Study and Optimization of Shredding Speed to Improve the Efficiency of Small-Sized Disc Shredder for Plant Residues .....	
	84
<b>Kravchenko L. V., Kravchenko V. A., Zhurba V. V., Melikov I. M.</b> Agro Cross-Country Ability of Combine Harvesters with Driving Wheels Equipped with Different Tires .....	
	101
<b>Quliyev Z. V., Yaqubov K. G., Aliev E. M.</b> Optimizing the Parameters of a Universal Unit for Fodder Grinding .....	
	121
<b>Kurdyumov V. I., Isaev Yu. M., Pavlushin A. A., Gorelyshev E. M.</b> Substantiating the Design Parameters of a Cleaner of Crops from Soil .....	
	139

### ***FRICTION AND WEAR IN MACHINES***

<b>Kravchenko I. N., Feskov S. A., Senin P.V., Chumakov P. V., Gutsan A. A.</b> The use of Epoxy-Gravel Composites to Harden Composite Ploughshares with the Possibility of Restoring the Components Having Radial Wear .....	
	155

<i>Information for Authors and Readers of the Journal</i> .....	170
-----------------------------------------------------------------	-----

**РЕДАКЦИОННАЯ СТАТЬЯ /  
EDITORIAL**<https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202501.010-012>EDN: <https://elibrary.ru/cpzhu>

УДК 631.35

ISSN Print 2658-4123

ISSN Online 2658-6525

<https://vestnik.mrsu.ru>*Редакционная статья / Editorial***На границе прошлого с грядущим.  
Журнал «Инженерные технологии и системы»  
отмечает 35-летие!****On the Border Between the Past and Future.  
The Journal “Engineering Technologies and Systems”  
Celebrates its 35<sup>th</sup> Anniversary!**

*Ты  
Не почитай  
Себя стоящим  
Только здесь вот, в сущем,  
В настоящем,  
А вообрази себя идущим  
По границе прошлого с грядущим.*

*Л. Мартынов*

В этом году журнал «Инженерные технологии и системы» отмечает свое 35-летие. Пришло время поздравить журнал с его достижениями и вкладом в область инженерии, но, что еще важнее, заглянуть в будущее.

Журнал основан в 1990 г. Национальным исследовательским Мордовским государственным университетом (далее – Университет) под названием «Вестник Мордовского университета». Решение о его издании было принято на заседании коллегии Государственного комитета Совета Министров РСФСР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли (выписка из протокола № 17 от 26.09.1989 г.). Приказ № 363 об организации издания подписан Министерством высшего и среднего специального образования 26.10.1989 г. Главным редактором утвердили ректора Университета, заслуженного деятеля науки РСФСР, профессора А. И. Сухарева (1990–1992 гг.). В 1992 г. редакционную коллегию журнала возглавил ректор Университета, профессор Н. П. Макаркин (1992–2009 гг.).

С момента основания журнал издавался в печатном формате, в открытом доступе и бесплатно для авторов. В нем публиковались результаты важнейших научных исследований, проводимых в Университете по всем научным специальностям. Задачи журнала определялись идеями интеграции отраслей научного знания, историческим контекстом и были связаны с задачами государства в годы перестройки высшей школы. Отличительной чертой первых лет издания журнала

© Сенин П. В., 2025

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

стало отсутствие четкой структуры: главной целью было максимально охватить все направления научно-исследовательской деятельности ученых Университета. Каждый номер делился на рубрики, в которых печатались результаты исследований, проводившихся на разных факультетах. Однако по мере развития Университета, усложнения его структуры происходила и дифференциация единого ранее журнала. С 2006 г. «Вестник Мордовского университета» стал делиться на серии, поскольку каждый факультет стремился предложить читателям все большее количество информации о проводимых исследованиях. Многие студенты и аспиранты вуза опубликовали свои первые научные труды на его страницах.

В 2009 г. редакционную коллегию журнала возглавил ректор Университета, доцент С. М. Вдовин (2009–2021 гг.). Поиск оптимальной модели размещения материалов в журнале и тематической структуры привел к сужению тематики и изменению названия издания. В 2019 г. журнал получил свое нынешнее название и вышел на новый уровень международных стандартов, практикуемых редакцией научных журналов Университета. Изменение географии авторов свидетельствует о том, что журнал все в большей степени привлекает к себе внимание мировой научной общественности.

В 2021 г. главным редактором назначен доктор технических наук, профессор, руководитель Высшей школы развития научно-образовательного потенциала Национального исследовательского Мордовского государственного университета П. В. Сенин (2021 – по настоящее время). Свидетельством научной значимости журнала является его индексация в международной базе Web of Science (ESCI), «Белом списке» (список научных журналов, созданный в целях обеспечения мониторинга и оценки публикационной активности), Russian Science Citation Index (RSCI), национальной библиографической базе данных «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ), SHERPA / Romeo, базе журналов открытого доступа DOAJ и включение 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).

Кроме того, журнал выступает участником ассоциации OASPA, партнерства CrossRef, Комитета по публикационной этике COPE, профессионального сообщества «Ассоциация научных редакторов и издателей» (АНРИ), что свидетельствует о соответствии редакционной политики журнала высоким международным требованиям.

На протяжении 35 лет изменилось многое: одно тысячелетие сменило другое, страна стала другой, но журнал сохранил свои первоначальные принципы: открытый доступ к результатам исследований, способствующий увеличению глобального обмена знаниями, поддержка со стороны научных школ Университета и содействие распространению передовых научных знаний.

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. Он предлагает ученым и практикам международную площадку для научной дискуссии исследователей, обмена опытом и публикации актуальных достижений. 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.

Журнал способствует распространению научных теорий, результатов исследований и предложений, а также опыта в области инженерных технологий не только благодаря высококачественным статьям, публикуемым в журнале, но и нашему активному присутствию в социальных сетях и созданию нового пространства для неформального обсуждения тем журнала.

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.

Журнал предоставляет открытый доступ к полным текстам публикаций, исходя из следующего принципа: открытый доступ к результатам исследований способствует увеличению глобального обмена знаниями. При этом редакция журнала реализует принцип нулевой толерантности к плагиату и осуществляет мониторинг некорректных заимствований.

Безусловно, объем решаемых журналом задач становится все больше, поскольку динамичное развитие науки обеспечивает огромный поток информации, требующей анализа и обобщения, также возрастают требования к качеству публикуемых материалов. Однако коллектив журнала «Инженерные технологии и системы» успешно справляется с современными вызовами благодаря профессионализму сотрудников. Мы благодарны авторам, рецензентам, редакторам, издателям и читателям за их постоянную поддержку. Необходимость смотреть в будущее обязывает всех участников редакционно-издательского процесса постоянно анализировать серьезные научные проблемы, с которыми мы сталкиваемся в настоящее время, формулировать предложения, проводить исследования, которые помогут продолжать совершенствовать инженерные технологии и системы. Поддерживать высокий научный уровень журнала – одна из основных задач редакционной коллегии. Достижение успехов журнала представляется нам возможным за счет привлечения в качестве авторов высоко цитируемых ученых, расширения поля проблем и публикаций актуального характера, неуклонного соблюдения норм публикационной этики, постоянного внимания к качеству публикаций.

*Спасибо всем вам за поддержку!*

**Сенин Петр Васильевич,**  
главный редактор журнала  
«Инженерные технологии и системы»

*Об авторе:*

**Сенин Петр Васильевич**, доктор технических наук, профессор кафедры технического сервиса машин Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3400-7780>, Researcher ID: H-1219-2016, SPIN-код: 3197-5080, vice-rector-innov@adm.mrsu.ru

*About the author:*

**Petr V. Senin**, Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Department of Technical Service of Machines, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3400-7780>, Researcher ID: H-1219-2016, SPIN-code: 3197-5080, vice-rector-innov@adm.mrsu.ru

*Поступила в редакцию 27.01.2025; принята к публикации 04.02.2025*

**ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ /  
ELECTRICAL TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT**<https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202501.013-029>EDN: <https://elibrary.ru/cpzhu>

УДК 631.35

ISSN Print 2658-4123

ISSN Online 2658-6525

<https://vestnik.mrsu.ru>*Оригинальная статья / Original article***Technology for Adjusting Working Tools of a Rotary Harvester Based on Fuzzy Modelling****V. P. Dimitrov**✉, **I. N. Nurutdinova**,**L. V. Borisova**, **A. A. Papchenko***Don State Technical University**(Rostov-on-Don, Russian Federation)*✉ [kaf-qm@donstu.ru](mailto:kaf-qm@donstu.ru)**Abstract**

**Introduction.** The need to increase productivity of grain harvesting equipment and minimize crop losses has given rise to the increasing use of axial-flow combines (rotary harvester). The efficiency of harvesting operations depends on correct setting of the adjustable harvester parameters allowing full use of its design capabilities. For this reason, it is relevant to study the problems of optimal adjusting the working tools of a harvester operating in various environmental conditions.

**Aim of the Study.** The study was aimed at developing an approach to the choice of optimal values for the adjustable parameters of the rotor type grain harvesters.

**Materials and Methods.** Harvesting quality indices, adjustable parameters, and environmental factors are interdependent, so there has been used a linguistic approach to the description of the subject domain. Information about environmental conditions, the harvester technical state, interrelations between parameters and harvesting indicators is fuzzy that has led to the application of the theory of fuzzy sets to solve the problem of optimal choice of the adjustable parameters. The procedure of fuzzy logic inference has been performed in Fuzzy Logic Toolbox (MatLab) package.

**Results.** There are presented the results of the developed approach to the problem of operational presetting adjustable parameters of a rotary harvester when harvesting various grain crops under different environmental conditions. The problem solution concept has been developed on the basis of the fuzzy logic formalism. A linguistic description of the problem has been given. Models of the considered features in the form of membership functions are proposed, which adequately take into account the external conditions in which the harvester operates. Basic and extended term sets have been identified. The optimal models have been selected on the basis of the consistency analysis of fuzzy expert knowledge using the indicators of general and pair consistency of the models. The results of the solutions obtained have been illustrated. On the basis of collected and analyzed expert information there has been created a base of fuzzy expert knowledge including the fuzzy production rules for 12 adjustable parameters of TORUM harvester. Different combinations of the values of environmental factors have been considered, for which there has been given an inference about specific values of the adjustable parameters.

© Dimitrov V. P., Nurutdinova I. N., Borisova L. V., Papchenko A. A., 2025

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

*Discussion and Conclusion.* The practical significance of the research carried out lies in the creation of a basis for an intelligent information system to help a rotary harvester operator in making decisions on choosing adjustable parameter values when harvesting various grain crops. The use of such a system in field conditions in combination with sensors for continuous monitoring of harvesting conditions and an automated image analysis system will allow for a prompt response to changing conditions, significantly increase work efficiency and reduce decision-making time. The implementation of such systems will significantly reduce the information load on the operator, as well as use operators with little practical experience during harvesting. The development of such information systems creates the preconditions for increasing the level of automation of intelligent control of a grain harvester and is an important stage in the implementation of the approach to unmanned control of a harvester.

**Keywords:** rotary grain harvester, adjustable parameters of a grain harvester, preliminary setting of working tools, axial flow threshing and separating device, linguistic approach, membership function, production rules, fuzzy inference

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

**For citation:** Dimitrov V.P., Nurutdinova I.N., Borisova L.V., Papchenko A.A. Technology for Adjusting Working Tools of a Rotary Harvester Based on Fuzzy Modelling. *Engineering Technologies and Systems*. 2025;35(1):13–29. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202501.013-029>

## Технология настройки рабочих органов роторного комбайна на основе нечеткого моделирования

**В. П. Димитров** ✉, **И. Н. Нурутдинова**,  
**Л. В. Борисова**, **А. А. Папченко**

*Донской государственный технический университет*  
(г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

✉ [kaf-qt@donstu.ru](mailto:kaf-qt@donstu.ru)

### Аннотация

**Введение.** Необходимость повышения производительности зерноуборочной техники и минимизации потерь урожая обусловила все большее использование комбайнов с аксиально-роторным молотильно-сепарирующим устройством. Эффективность уборочных работ определяется правильностью настройки регулируемых параметров комбайна, позволяющей полностью использовать его конструктивные возможности. В связи с этим актуальным является исследование проблем оптимальной настройки рабочих органов комбайна, функционирующего в различных внешних условиях.

**Цель исследования.** Разработка подхода к выбору оптимальных значений регулируемых параметров зерноуборочных комбайнов роторного типа.

**Материалы и методы.** Показатели качества уборки, регулируемые параметры и внешние факторы связаны неоднозначными перекрестными взаимозависимостями, что обусловило использование лингвистического подхода для описания предметной области. Информация о внешних условиях, техническом состоянии комбайна, взаимосвязях между параметрами и показателями уборки в основном носит нечеткий характер, это определило применение теории нечетких множеств для решения задачи оптимального выбора регулируемых параметров. Процедура нечеткого логического вывода значений параметров выполнялась в пакете Fuzzy Logic Toolbox (MatLab).

*Результаты исследования.* Представлены результаты разработанного подхода к проблеме оперативной предварительной настройки регулируемых параметров комбайна роторного типа при уборке зерновых культур для различного спектра внешних условий. На основе формализма нечеткой логики построена схема решения задачи. Дано лингвистическое описание задачи. Предложены модели рассматриваемых признаков в виде функций принадлежности, адекватно учитывающие внешние условия, в которых функционирует комбайн. Установлены базовые и расширенные терм-множества. Оптимальные модели выбраны на основе анализа согласованности нечетких экспертных знаний с использованием показателей общей и парной согласованности моделей. Результаты полученных решений проиллюстрированы. Собрана и проанализирована экспертная информация, на основе которой создана база нечетких экспертных знаний, включающая правила нечеткой продукции для 12 регулируемых параметров комбайна ТОРУМ. Рассмотрены различные комбинации значений внешних факторов, для которых приведен вывод конкретных значений регулируемых параметров.

*Обсуждение и заключение.* Практическая значимость выполненных исследований заключается в создании основы интеллектуальной информационной системы для помощи оператору комбайна роторного типа в принятии решений по выбору значений регулируемых параметров при уборке различных зерновых культур. Применение такой системы в полевых условиях в комплексе с датчиками непрерывного мониторинга условий уборки урожая и автоматизированной системой анализа изображений позволит оперативно реагировать на изменение условий, существенно повысить результативность работы и сократить время принятия решений. Внедрение таких систем поможет значительно снизить информационную нагрузку на оператора, а также использовать во время уборки механизаторов с малым практическим опытом работы. Разработка подобных информационных систем создает предпосылки повышения уровня автоматизации интеллектуального управления зерноуборочным комбайном и является важным этапом реализации подхода к беспилотному управлению комбайном.

**Ключевые слова:** зерноуборочный комбайн роторного типа, регулируемые параметры зернокомбайна, настройка рабочих органов, аксиально-роторное молотильно-сепарирующее устройство, лингвистический подход, функции принадлежности, производственные правила, нечеткий логический вывод

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Димитров В.П., Нурутдинова И.Н., Борисова Л.В., Папченко А.А. Технология настройки рабочих органов роторного комбайна на основе нечеткого моделирования. *Инженерные технологии и системы.* 2025;35(1):13–29. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202501.013-029>

**Introduction.** Ensuring food security is one of the major tasks of agriculture. Harvesting and preserving crops have an important role in solving this problem. First of all, this concerns harvesting of grain and grain legumes, while one of the main tasks is high-quality harvesting with minimal losses. In this area, continuous improvement of harvesting equipment takes place [1]. Thus, in recent years, the use of grain harvesters with axial-flow threshing and separating device (AFTSD) has been increased. The advantages of this type of the harvesters are higher throughput capability, lower percent of grain crushing [2], and ability to operate in more weedy fields compared to the harvesters of classical design [3]. It should be noted that there is carried out continuous design improving of the harvesters with AFTSD [3; 4], including to expand the range of harvested crops [5; 6]. Thus, high-performance harvesters with AFTSD are becoming more widely used, and this is the reason why relevance and importance of optimal setting of their adjustable parameters are increasing. Effective operation under various environmental conditions requires adequate adjustment of the working tools

of the harvester that is based on information about the harvesting factors, performance indicators, and technical condition of the machine. The interrelations between these groups of characteristics are complex and ambiguous, and the information itself is different and fuzzy. In addition, the operation in field conditions requires quick response to changing conditions of harvesting, while the errors in setting parameters of the harvester result in grain losses, reduced productivity, and increased fuel consumption [7], that is the inherent design capabilities of the harvester are not used fully. The same is true for the subject of study in this article – 7<sup>th</sup> class harvesters with AFTSD – TORUM 740.

The aim of the present paper is using fuzzy logic to develop an approach to the choice of an optimal preliminary setting of the adjustable parameters of grain harvesters with AFTSD. The suggested approach is aimed at increasing the harvester productivity and minimizing losses while harvesting. The results of the study are the basis of the intelligent information systems (IIS) to help the operator in making decisions on the choice of values for the adjustable parameters of a rotary harvester.

**Literature Review.** The central problem during harvesting is minimizing crop losses. As is known [8], experienced operators have approximately 1.5 times higher productivity of the harvester, and low overall losses. However, not all the operators have qualification high enough to set the parameters, which comply with the harvesting conditions. The solution to the problem of optimal choice of the values of the harvester adjustable parameters under different harvesting conditions (which can change rather often per day) is the development of IIS suitable for solving the assigned problems [8; 9]. These systems will make it possible for the operators of different qualifications to solve this problem properly.

Over the past few years, the IISs have been successfully used in various areas of agricultural complex for decision-making, including the problems of managing complex technical systems using contemporary approaches such as fuzzy modelling, neuron nets, and automated control systems [9–11].

In solving the problem of increasing productivity of harvesters and optimizing their characteristics we can distinguish two main lines. The first one is further improving of the design of a harvester and its individual units, subsystem, and elements. In [7], the results of comparative studies of energy and harvesting efficiency indicators of rotary harvesters with different design solutions are presented showing the feasibility of using such harvesters. There are conducted the studies on making changes to the design of AFTSD elements [6; 12], which make it possible to increase productivity and quality when harvesting various crops. The second line of the study is the improvement of the performance characteristics of a harvester by optimizing modes of operation. The papers [12–14] present the results of selecting operation modes and setting such parameters as rotor speed, amount of clearance between a rotor and a concave etc. when harvesting various crops on the basis of the models constructed on the empirical data. In [15], there we obtained and analyzed empirical dependencies of fuel consumption and a harvester parameters setting when harvesting wheat, barley, oats with various humidity and yields, and there was presented a very significant effect of even small changes in harvesting conditions on the setting parameters and indicators of harvesting quality.

As already mentioned above, the productivity of harvesters depends largely on the operator qualification, which is not always sufficient to assess the environmental

conditions and the corresponding choice of the adjustable harvester parameters. In this case, a promising direction is reducing the role of the operator while operating the harvester during field work [8]. This constituent part of design and technological solutions can be implemented through introduction of intelligent information systems in combination with automated systems for monitoring the state of environmental factors [8; 16]. Fuzzy models are used for creating these systems [11; 17; 18]. Nowadays, the expediency of using fuzzy logic for solving the problems of intelligent control does not raise doubts and is successfully applied, including for solution of the problems in the agro-industrial complex. The range of such problems is rather wide, including weeds identification, assessment of yields, assessment of the soil quality, increase of crop productivity, and efficiency of using fertilizers and others [19–21]. In [22–24], the application of this approach to the problem of assessing the values of the harvester adjustable parameters is justified.

This approach has been applied in this article to develop the method of choosing optimal adjustment parameters for the grain harvesters with AFTSD.

**Materials and Methods.** The proposed approach to the development of a method for preliminary setting the adjustable parameters of classic drum-type grain harvesters is presented in [24]. However, rotary harvesters have significant design and technological differences, so it is necessary to develop a scheme for solving this problem for the harvesters with AFTSD.

On the basis of the principle of decomposition, we will divide the problem facing the decision maker (in this case, the operator) into several subproblems. One of the subproblems is assess the values of environmental factors and performance indicators defining the next subproblem of parameters choosing. It is reasonable to consider the solution of each subproblem as a decision-making procedure under the conditions of uncertainty. In field conditions, it is advisable for the operator to have in advance a certain set of strategies for his actions in the form of a sequence of certain procedures. In the absence of these strategies, the risk of making incompetent decision on assessing environmental factors of harvesting and choice of adjustable parameters values increases for the operator.

We should also note that most part of the factors to be assessed is difficult to be accurately measured, for example, such factors as plant stand density, humidity or grain dockage. To identify these factors, it is necessary to apply the methods of formalized assessment by experts.

Making decisions about setting parameter values is based on fuzzy logic inference, and the process of solving the problem itself incorporates three stages: fuzzification, composition, and defuzzification. Figure 1 presents a detailed diagram of the process for solving the problem under consideration. Let us analyze in detail the stages of the solution.

The stage of fuzzification consists in a linguistic description of the problem conditions. The environmental factors that are essential for the problem under consideration are identified. The set of these factors is denoted as  $X$ :

$$X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\},$$

where  $n$  is a number of factors.

The output variable in this problem, the adjustable parameter of the grain harvester, will be denoted by  $Y$ .

Next, a qualimetric evaluation of the carrier scales is performed, basic and extended term sets of the linguistic variables (LV) are determined, membership functions  $\mu_{X_i}$  are defined:

$$\mu_{X_i}: X_i \rightarrow [0, 1].$$

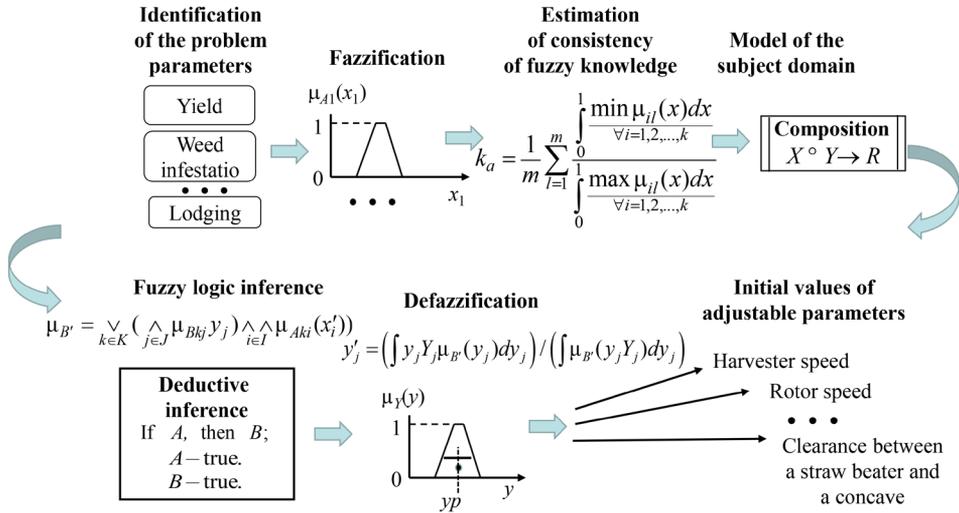


Fig. 1. Scheme of making the solution of the problem under consideration

Source: hereinafter in this article all figures are compiled by the authors of the article.

Typical functions were used to carry out parametric identification. Among the possible types of functions, a standard set of functions of triangle and trapezoidal forms (Table 1) are often used to construct the membership functions (MFs). This choice is acceptable for further use in Fuzzy Logic Toolbox (MatLab) application software package and is understandable for experts when estimating parameters of the functions. It should be noted, that it is possible to use other types of functions that satisfy the requirements for forming MF, for example, a Gaussian function.

Table 1

Type of membership function

When constructing membership functions, the following typical functions were used (parameters  $a, b, c$  and  $d$  were assigned separately for each factor and parameter of the machine)

Extreme left term	Middle term	Extreme right term
$\mu(x) = \begin{cases} 1, & \text{if } x \leq a; \\ \frac{b-x}{b-a}, & \text{if } a < x < b; \\ 0, & \text{if } x \geq b. \end{cases}$	$\mu(x) = \begin{cases} 0, & \text{if } x \leq a; \\ \frac{x-a}{c-a}, & \text{if } a < x < c; \\ 1, & \text{if } c \leq x \leq d; \\ \frac{b-x}{b-d}, & \text{if } d < x < b; \\ 0, & \text{if } x \geq b. \end{cases}$	$\mu(x) = \begin{cases} 0, & \text{if } x \leq a; \\ \frac{x-a}{b-a}, & \text{if } a < x < b; \\ 1, & \text{if } x \geq b. \end{cases}$

Let us detail the issues of constructing the MF. The type of the MF is set axiomatically taking into account the requirements for symmetry, monotonicity, and other properties of the simulated attribute, its semantic content. For our problem it is a physical meaning.

The parameters of the MF are determined by experts, so the parameters meaning should be clear. First of all, the set of values of the MF carrier must be clearly determined, in which MF is of 0 and 1, for example, for central terms it is necessary to determine the values  $x_1, x_2, x_3$ , such that for all  $x_2 \mu_A(x) = 1$ , and for all  $x \leq x_1$  and  $x \geq x_3 \mu_A(x) = 0$ .

The formal representation of the terms of the linguistic variables on the real  $R$  axis is determined by their physical meaning. Let us denote lower and upper boundary of the set  $\inf X = x'$  and  $\sup X = x''$ , and the term, characterized by the carrier located to the left on the real axis will be numbered by a lower number. Ordering of the set  $T$  obeys the expression:

$$(\forall T_i \in T)(\forall T_j \in T)(i > j \leftrightarrow (\exists x \in C_i)(\forall y \in C_j)(x > y)).$$

The term-sets of the MF under consideration should satisfy the conditions:

$$\begin{aligned} \mu_{C_i}(x') &= 1, & \mu_{C_m}(x'') &= 1; \\ (\forall T_i \in T \setminus \{T_m\})(0 < \sup_{x \in X} \mu_{C_i \cap C_{i+1}}(x) < 1); \\ (\forall T_i \in T)(\exists x \in X)(\mu_{C_i}(x) &= 1); \\ (\forall \beta)(\exists x' \in R_i)((\forall x \in X)(x' < X < x'')). \end{aligned}$$

When constructing the terms in this article, all the mentioned above conditions were fulfilled and normal fuzzy sets with height of  $d = 1$  were considered

Parametric identification includes determining the optimal number of the MF values – terms, their carriers, and the MF parameters. The result of structural identification is a scheme of the problem solution (Fig. 2). Furthermore, it should be noted that this scheme corresponds to the direct problem, which consists in determining the optimal values of the adjustable parameters depending on the values of the harvesting factors, i.e. input variables are the harvesting factors, and the output ones are the adjustable parameters of a harvester. For the second, inverse problem, it is necessary to structure relationships between the adjustable parameters and the quality indicators of the harvester operation when the input variables are the adjustable parameters, and the output ones are the indicators of the quality of operation.

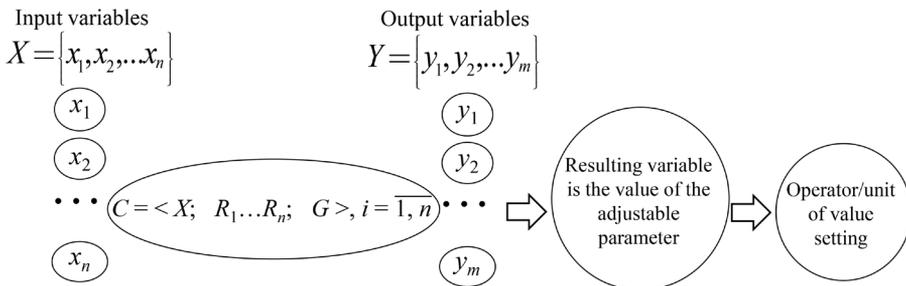


Fig. 2. Result of structural identification of the subject domain

The power of the set of the problem variables, which are parameters or factors, is determined by the specifics of the problem. In the problem under consideration, the powers of the sets of input and output attributes are different. Obviously, they depend on the type of crop, and in more general context, on the type of a harvester.

In solving the problem of inferring the output variable value using fuzzy logic, significant importance is given to expert information. Expert estimates of the parameters for membership functions are tested for consistency, for that reason, matrices of consistency indicators and matrices of fuzziness indices are calculated characterizing the pair consistency, as well as additive and multiplicative indicators of overall consistency of models [24]. Equally important is the contribution of experts to the creation of a base of production rules that serve as the basis for fuzzy logic inference of the value of the output parameter.

The selected product model has the form:

$$i: A \Rightarrow B; (F),$$

where  $i$  is the name of the fuzzy product;  $A \Rightarrow B$  is the kernel of production,  $A$  is an antecedent,  $B$  is a consequent,  $\Rightarrow$  is a logical implication operator;  $F$  is the validity coefficient of the product, by default it is selected equal to one. The text form of the product kernel has the form: IF “ $A_1$ ” and “ $A_2$ ”, THEN “ $C_1$ ”.

The system of fuzzy statements must satisfy the requirements of linguistic non-redundancy, completeness, and noncontradiction that is one of the conditions for the adequacy of subsequent decisions.

Let us denote by  $\tilde{A}_j$  и  $\tilde{B}_j$  the statements  $\langle \beta_w \text{ is } \alpha_{w_j} \rangle$  and  $\langle \beta_y \text{ is } \alpha_{y_j} \rangle$ , where  $\alpha_{y_j}$  is the corresponding values of the terms of the output LV.

With a given system of logical statements for the values of input attributes, the values of the output parameter  $Y$  are such set  $Y_0^{(1)}$ , for each element of which  $y \in Y_0^{(1)}$  the output scheme:

$$\begin{aligned} \tilde{L}_j^{(1)} &: \langle \text{IF } \tilde{A}_j, \text{ THEN } \tilde{B}_j \rangle; \\ \tilde{A}' &- \text{true}; \\ \tilde{B}' &- \text{true}. \end{aligned}$$

Has the most degree of truth  $\mu_{mp}^{(1)}$  of the fuzzy rule modus ponens, which is defined by the expression:

$$\mu_{mp}^{(1)}(1) = \min \{1, [1 - \mu_{w_1}(w') + \mu_{y_1}(y')], \dots, [1 - \mu_{w_m}(w') + \mu_{y_m}(y')]\}.$$

The value  $\mu_{mp}^{(1)}(1)$  is the degree of truth of the modus ponens rule for a fuzzy system of expert statements, it reflects the degree of consistency of the value  $y'$  of the output parameter  $Y$  to the value  $w'$  of the generalized input parameter  $W$  when specifying expert information by the fuzzy system:



$$\tilde{L}^{(1)} = \begin{cases} \tilde{L}_1^{(1)}: \langle \text{if } \tilde{A}_1, \text{ then } \tilde{B}_1 \rangle, \\ \tilde{L}_2^{(1)}: \langle \text{if } \tilde{A}_2, \text{ then } \tilde{B}_2 \rangle, \\ \tilde{L}_m^{(1)}: \langle \text{if } \tilde{A}_m, \text{ then } \tilde{B}_m \rangle. \end{cases}$$

Thus, the decision inference mechanism is based on a model of the given subject domain which is represented by a composition of fuzzy relationships of semantic spaces of input and output parameters. In general case, the expanded form of the fuzzy logical inference for the considered system of knowledge has the form:

$$\mu_{B'} = \bigvee_{x \in X} (\mu_{A'}(x) \wedge \mu_R(x, y)).$$

The defuzzification process consists in converting the fuzzy inference into a clear number, in this case, into a parameter definite value which is suggested to the operator for decision-making. There are a number methods which make it possible to interpret a fuzzy value as a specific numeric value. The center of gravity method is applied more often than others. In this case, the center of gravity is determined as a weighted average value of all the values in the domain of determining the membership function. Thus, as a result of the fuzzy inference, the fuzzy number is converted into a clear number. Defuzzification is the final step in the process of fuzzy inference and makes it possible to obtain a specific numerical value based on a fuzzy result, which can be used to make decisions or control the system.

**Results.** Adaptation of the stages discussed above to the solution of the problems of preliminary setting of a rotary-type grain harvester allows us to associate the method of solution with the previously used for setting the harvester of classical type under fuzzy harvesting conditions [24].

On the basis of our own practical experience of operation of this-type harvesters, analysis of the literature references [12–14], and expert information about the features of grain harvesting, groups of harvesting factors and AFTSD parameters and the reaping part were identified as semantic spaces [25]. A fragment of the list of these groups is presented in Table 2.

Table 2

Input and output linguistic variables

№	Name of LV	Tuple	Universal scale
1	2	3	4

Input LV

1	Yield (Yi) (for wheat)	<Yi, hkg/ha {Very small, Small, Average, Large, Very large}>	[10–80]
2	Plantstand lodging (Lod)	<Lod, % {Upright, Low, Average, High}>	[0–40]
3	Plant stand density (Den)	<Den, number of stems {Rarefied, Below average, Average, Thick}>	[100–1 000]

*End of Table 2*

1	2	3	4
4	Grain humidity (GH)	<GH, % {Dry, Medium-humid, Humid}>	[10–22]
5	Weed infestation of plant stand (WI)	<WI, % {Absence, Small, Average, Big}>	[0–0]
6	Strawiness (S)	<S, % {Small, Normal}>	[40–60]
Output LV			
1	Harvester motion speed (HTS)	<HTS, km/h {Very low, Low, Average, High, Very high}>	[2.5–11]
2	Rotor Speed (RS)	<RS, rev/min {Very low, Low, Below average, Average Above average, Very high}>	[600–1 100]
3	Horizontal reel extension (HRE)	<HRE, mm {Insignificant, Below average, Average, Far}>	[20–70]
4	Clearance between rotor rasps and concave rasps (CRRCR)	<CRRCR, mm {Small, Average, Big}>	[15–20]
5	Drift angle of turns of a concave threshing part (DATCTP)	<DATCTP, location {At the beginning, In the middle, At the end}>	[0–38]
6	Drift angle of turns of a concave separating part (DATCSP)	<DATCSP, location {At the beginning, In the middle, At the end}>	[0–56]
7	Clearance between a straw beater and a concave (CSBC)	<CSBC, mm {Small, Average, Big}>	[10–35]
8	Cleaning fan speed at rated engine speed (CFSRES)	<SFSRES, rev/min {Very low, Low, Below Average, Average, Above average, High}>	[600–900]

Let us consider a technological process of harvesting grain crops. We will define  $X$ ,  $Y$  – vectors of environmental factors, adjustable parameters accordingly, and the vector of quality indicators  $B$ .

The components of the vector  $X$  are the environmental factors influencing the harvesting process of spiked cereals are presented by the following sets:  $X_1$  – yield;  $X_2$  – grain humidity;  $X_3$  – dockage;  $X_4$  – strawiness;  $X_5$  – lodging;  $X_6$  – plant stand density etc.

The components of the vector  $Y$  are adjustable parameters of the reaping part and threshing machine are presented by the following sets:  $Y_1$  – harvester travel speed;  $Y_2$  – rotor speed;  $Y_3$  – horizontal reel extension;  $Y_4$  – clearance between rotor rasps and concave rasps;  $Y_5$  – drift angle of turns of the concave threshing part;  $Y_6$  – drift angle of the turns of the concave separating part;  $Y_7$  – clearance between the straw beater and the concave etc.

As a result of the analysis of the considered sets, there have been identified environmental factors that are essential for this problem, adjustable and design parameters of the harvester. The corresponding linguistic variables have been determined.

Practical experience when harvesting agricultural crops, analysis of scientific papers [12–14], and design features of the harvester made it possible to establish scales of carriers identified by LVs representing input and output parameters of the problem. For example, Figure 3 presents boundaries of the terms for the adjustable parameters of the harvester taking into account characteristic features of the harvested crops.

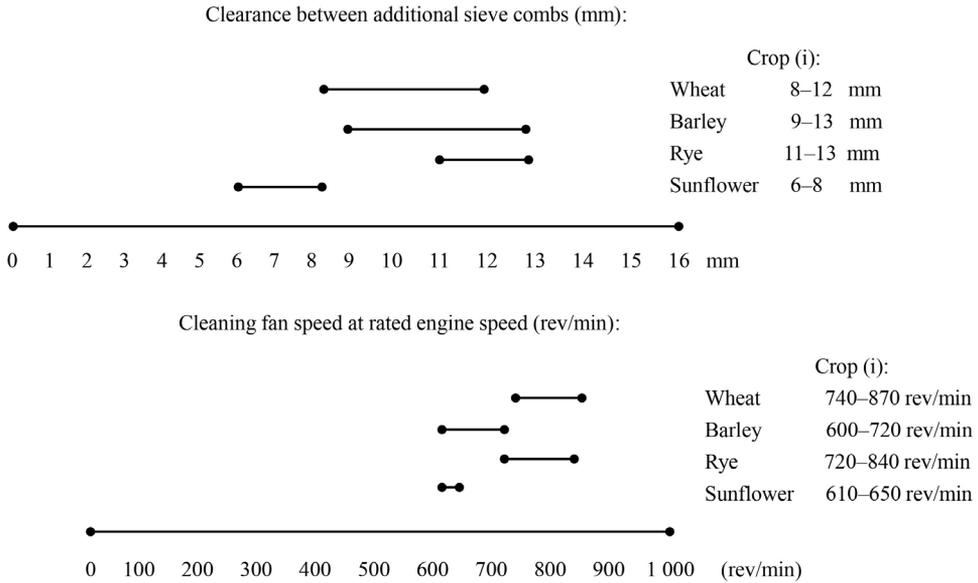


Fig. 3 Boundaries of the terms of the adjustable parameters

As a result of modelling the subject domain, there were determined membership functions for all 9 environmental factors and 12 adjustable parameters. As an example, there is presented a linguistic description of one of the environmental factors – “plant stand density” of wheat and one of the adjustable parameters – “rotor speed”. Formally, the description of LV is presented as follows:

$$\langle \text{Den\_wheat \% } \{ \text{Rar, Ba, Av, Th} \}, [100-1\ 000] \rangle,$$

$$\langle \text{RS\_sunflower, rev/min } \{ \text{VL, L, BA, A, AA, VH} \}, [220-560] \rangle.$$

When formalizing, standard functions of trapezoidal and triangle forms were used. The parameters of the functions were determined by 5 experts having practical experience in field work. To describe environmental factors of harvesting, 2-term, 3-term, and 4-term models were used.

It should be noted, that an increase in the number of terms when describing input factors significantly increases the number of production rules of the knowledge base, i.e. the power of the set of rules increases. Increasing the number of rules can lead to flaws in knowledge base creating.

Examples of MF diagrams are presented in figure 4. Figure 4a presents the results of the analysis for the harvested wheat crop with a yield of approximately 50 centners per hectare, Figure 4b presents the results for sunflower. To determine the MF, arithmetic mean of experts estimates were used which is justified by a high degree of consistency of expert knowledge. We also obtained original results for other crops: rye, barley, oats.

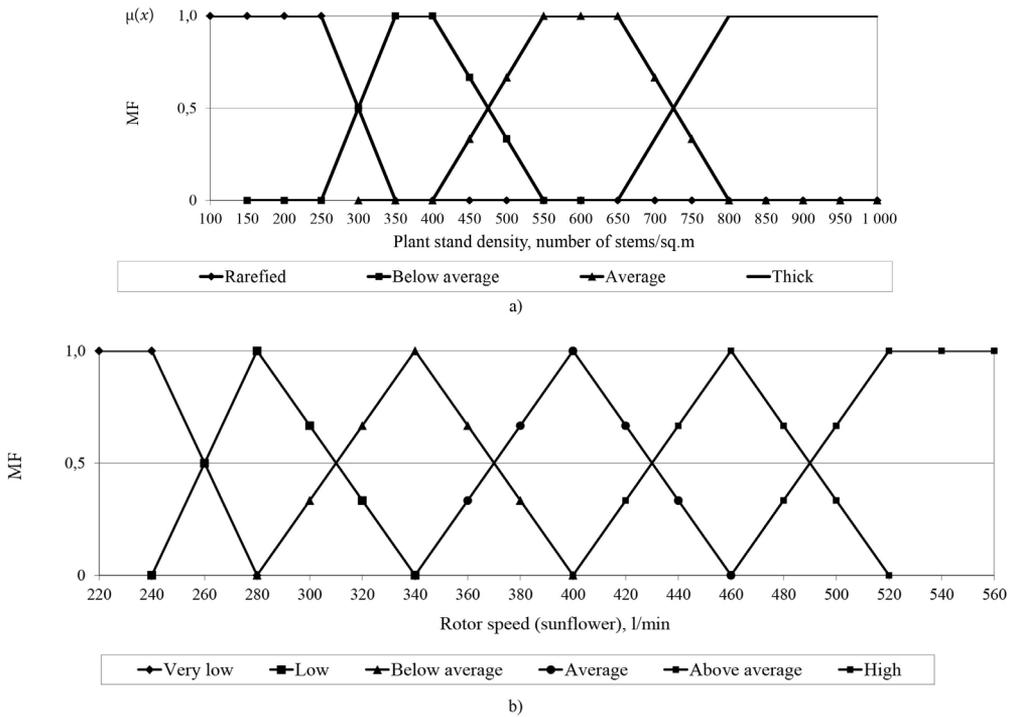


Fig. 4 Type of membership function for linguistic variables:  
a) environmental factor; b) adjustable parameter

Construction of the generalized MFs of inputs and output faces the question of the values of the weighting coefficients of the parameters specified by various experts. By default, these coefficients are assumed equal, and then the MF parameters are actually determined as arithmetic mean of the values given by the experts. This approach can be regarded as an initial approximation, but it requires justification. In cases when experts of different qualification are involved, and if experts use various indirect means for assessment, it is advisable to use one or another form of ranking information obtained from different experts. For example, Fishburne numbers or other types of linear order relations can be used. In this case, the ranks of experts can be determined a priori (for example, according to their qualifications), or a posteriori (for example, depending on consistency indicators). The examples of membership functions presented in Figure 4 are constructed under the condition that all experts have the same weight.

At the next stage of solving the problem (Fig. 1) the consistency of expert information was estimated. Here are some calculated values of the additive coefficient  $k$  of overall consistency. Thus, for LV “grain humidity”  $k = 0,898$ , and for LV “harvester travel speed”  $k = 0,796$ . For all input attributes and output parameters the values of coefficient  $k$  belong to the segment  $[0,765; 0,912]$ . These values make it possible to assert that the proposed term sets describe the sets of input attributes and adjustable parameters quite well and can be used for further construction of a fuzzy model of the solution inference.

The results of the linguistic description of input and output parameters made it possible to formulate the system of production rules that form the core of the knowledge base. It should be noted, that reducing the number of terms of input linguistic variable from five to three has resulted in significant reduction in the volume of the knowledge base and did not affect the adequacy of the subject domain model that is confirmed by the diagrams of three-dimensional response surfaces constructed in the Fuzzy Logic Toolbox (MatLab) application software package. Figure 5 presents for illustration two surfaces obtained on the basis of the system of 96 production rules for the output variable Harvester travel speed when harvesting wheat-50. A fragment of the system of production rules is presented in Table 3.

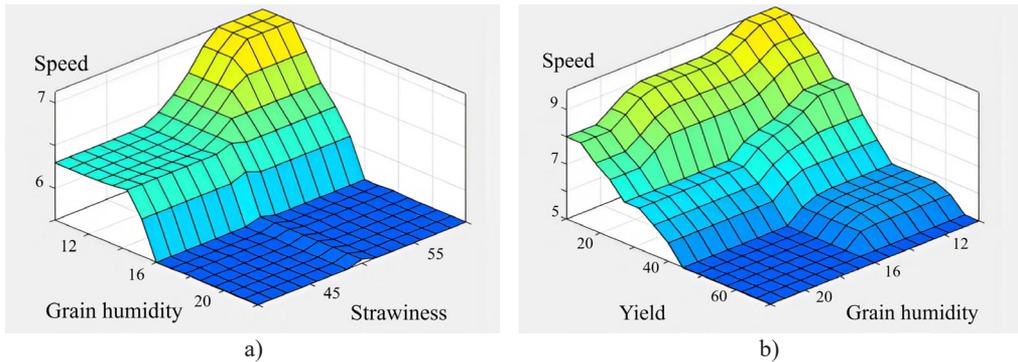


Fig. 5. Response surfaces of dependency of the harvester travel speed on a) grain humidity and strawiness; b) grain yield and humidity

Table 3

**Fragment of the production rules base**

№	Antecedent	Consequent
36	<Yield is “small” and Weed infestation is “small” and Grain humidity is “humid” and Strawiness is “normal”>	<Speed is average>
37	<Yield is “small” and Weed infestation is “average” and Grain humidity is “dry” and Strawiness is “small”>	<Speed is high>
38	<Yield is “small” and Weed infestation is “average” and Grain humidity is “dry” and Strawiness is “normal”>	<Speed is high>
...	...	...
95	<Yield is “very large” and Weed infestation is “large” and Grain humidity is “humid” and Strawiness is “small”>	<Speed is very low>
96	<Yield is “very large” and Weed infestation is “large” and Grain humidity is “humid” and Strawiness is “normal”>	<Speed is very low>

The analysis of the system of production rules carried out in MatLab (Fig. 5) confirmed the correspondence of the constructed fuzzy model of attribute relationships to the subject domain under study. All states of the system are described by the rules, the premises of which have a non-zero degree of membership. There are no contradictions in a system of rules when the rules have similar premises and mutually exclusive consequences.

The monotonous nature of the surfaces confirms a sufficient degree of objectivity of the production rules. Therefore, the created system of fuzzy rules can be used for fuzzy logic inference of the adjustable parameters. For example, in Fuzzy Logic Toolbox (MatLab) package, using the “center of gravity” method with the following input variable values: wheat yield 50 c/h, weed infestation 20%, grain humidity 13%, and strawiness 60%, the recommended harvester travel speed value was 5 km/h.

Thus, the approach created on the basis of expert estimation of environmental factors of harvesting, allows us to obtain necessary setting parameters of the harvester that correspond to the state of environment and the crop being harvested.

**Discussion and Conclusion.** As a result of the study, an approach has been developed to solve the problem of choosing the adjustable parameters of the rotary harvester depending on the environmental conditions of harvesting and the harvested crops. The use of linguistic representation of knowledge and fuzzy logic algorithms for the problem solution corresponds to the requirements of system analysis. As a result, the constructed models adequately take into account environmental conditions in which the harvester operate, and mutual relations between the main elements of the system. A formal description of the subject domain has been made (parametric and structural identification has been made) that fully corresponds to the real conditions of the harvester operation. On the basis of expert estimation, membership functions for all studied LVs (9 environmental factors and 12 adjustable parameters) have been identified, basic term sets and limits of change in basic variables have been determined. The performed analysis of consistency of expert fuzzy knowledge confirms the adequacy of the adopted models.

A base of fuzzy production rules was made, on which the fuzzy logic inference of expert system for setting working tools of the TORUM harvester is based. A model example of the values inference of the harvester adjustable parameters in the Fuzzy Logic Toolbox (MatLab) is given.

The proposed approach is relevant for a wide range of harvesting equipment and various crops. Technical difficulties in using this approach can arise when there are a large number of factors that need to be taken into account. When the power of the set of input variables is large, the number of rules for fuzzy production increases that leads to extensive work on entering the rules into the program. In this case, the use of neuro-fuzzy networks is promising; the implementation of this approach is also available in the MatLab environment.

Thus, the result of the study is the creation of a basis for the IIS to help the operator of the rotary-type harvester in making decisions on choosing values of the adjustable parameters when harvesting various grain crops. In addition to preliminary setting, the next problem is to develop a mechanism of correcting parameters in case of detecting inadequacy of the initially set parameters to the changed harvesting conditions, which manifests itself in deviating harvesting indicators from the specified values. This defines one of the lines for further studies. Another promising line is increasing automation for measurements of the values of harvesting factors and quality indicators for direct connection with the IIS that will increase the efficiency of its application.

## REFERENCES / СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhalnin E.V., Chaplygin M.E. Improving the Design of Combine Harvesters by Harmonizing Their Basic Technical Parameters. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(3):403–416. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202303.403-416>  
Жалнин Э.В., Чаплыгин М.Е. Совершенствование конструкции зерноуборочных комбайнов путем гармонизации их базовых технических параметров. *Инженерные технологии и системы*. 2023;33(3):403–416. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202303.403-416>
2. Pakhomov V., Chervaykov I., Kolin'ko A., Kambulov S., Hlystunov V. The Comparative Assessment Results of Winter Soft Wheat Grain Damage During Combine Harvesting. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2023;575:272–281. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-21219-2\\_28](https://doi.org/10.1007/978-3-031-21219-2_28)
3. Maslov G.G., Yudina E.M., Rinas N.A. Increase in Grain Combine Harvester Performance and in Quality of Harvesting Grain Crops. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022;949:012109. <https://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/949/1/012109>
4. Maslov G.G., Yudina E.M., Palapin A.V. The Directions of Effectiveness Improvement of Grain Harvesters. *AIP Conference Proceedings*. 2022;2503:030003. <https://doi.org/10.1063/5.0100048>
5. Aldoshin N., Didmanidze O., Mirzayev B., Mamatov F. Harvesting of Mixed Crops by Axial Rotary Combines. *Tae 2019 – Proceeding of 7<sup>th</sup> International Conference on Trends in Agricultural Engineering*. 2019:20–25. EDN: YMSVTO
6. Bakharev D., Pastukhov A., Volvak S., Kovalev S. Study of Seed Corn Threshing Process. *Engineering for Rural Development*. 2020;(19):1036–1041. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2020.19.TF243>
7. Jasper S.P., Zimmermann G.G., Savi D., Neto L.S., Kmiecik L.L., Sobenko L.R. Operational Performance and Energy Efficiency of Axial Harvesters with Single and Double Rotor Systems in Soybean Seed Harvest. *Ciencia e Agrotecnologia*. 2021;45:e031720. <https://doi.org/10.1590/1413-7054202145031720>
8. Zhalnin E.V., Godzhaev Z.A., Florentsev S.N. Conceptual Principles of Intelligent Agricultural Machines in the Case of Combine Harvester. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2017;(6):9–16. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: YLSVLC  
Жалнин Э.В., Годжаев З.А., Флоренцев С.Н. Концептуальные принципы интеллектуальных сельскохозяйственных машин на примере зерноуборочного комбайна. *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2017;(6):9–16. EDN: YLSVLC
9. Chen J., Ning X., Li Y., Yang G., Wu P., Chen S. A Fuzzy Control Strategy for the Forward Speed of a Combine Harvester Based on KDD. *Applied Engineering in Agriculture*. 2017;33(1):15–22. <https://doi.org/10.13031/aea.11299>
10. Zhang K., Cao S., Shen H., Wang H., Xu X., Han T., et al. Fuzzy Control System for Load Stability of Intelligent Combine Harvester. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018;439:052009. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/439/5/052009>
11. Li W., Zhang K., Lv G., Dai H., Zhang C. An Improved Fuzzy Logic Control Method for Combine Harvester's Cleaning System. *Automatic Control and Computer Sciences*. 2022;56:337–346. <https://doi.org/10.3103/S0146411622040058>
12. Aldoshin N., Didmanidze O. Harvesting Lupinus Albus Axial Rotary Combine Harvesters. *Research in Agricultural Engineering*. 2018;64(4):209–214. <https://doi.org/10.17221/107/2017-RAE>
13. Maslov G.G., Trubilin E.I. Revisited Grain Harvesters Parameters Substantiation and Effectiveness of them. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2016;(2):28–31. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: VTPVNP  
Маслов Г.Г., Трубилин Е.И. К обоснованию параметров зерноуборочных комбайнов и их эффективности. *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2016;(2):28–31. EDN: VTPVNP
14. Lipovskiy M.I. Increasing the Efficiency of Threshing in an Axial Rotary Combine. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2017;(4):45–50. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: YTXOHH  
Липовский М.И. Повышение эффективности обмолота в аксиально-роторном комбайне. *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 2017;(4):45–50. EDN: YTXOHH
15. Špokas L., Steponavičius D., Butkus V. Reduction of Fuel Consumption of Two Rotors Axial Flow Combine Harvester. *Journal of Food, Agriculture and Environment*. 2014;12(2):329–333. Available at: <https://clck.ru/3G4HbU> (accessed 27.08.2024).

16. Jha K., Doshi A., Patel P., Shah M. A Comprehensive Review on Automation in Agriculture using Artificial Intelligence. *Artificial Intelligence in Agriculture*. 2019;2:1–12. <https://doi.org/10.1016/j.aiaa.2019.05.004>
17. Semeraro T., Mastroleo G., Pomes A., Luvisi A., Gissi E., Aretano R. Modelling Fuzzy Combination of Remote Sensing Vegetation Index for Durum Wheat Crop Analysis. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019;156:684–692. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.027>
18. Sujaritha M., Annadurai S., Satheshkumar J., Sharan S.K., Mahesh L. Weed Detecting Robot in Sugarcane Fields Using Fuzzy Real Time Classifier. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2017;134:160–171. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.01.008>
19. Turan I.D., Dengiz O., Ozkan B. Spatial Assessment and Mapping of Soil Quality Index for Desertification in the Semi-Arid Terrestrial Ecosystem using MCDM in Interval Type-2 Fuzzy Environment. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019;164:104933. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104933>
20. Prabakaran G., Vaithiyathan D., Ganesan M. Fuzzy Decision Support System for Improving the Crop Productivity and Efficient use of Fertilizers. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2018;150:88–97. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.03.030>
21. Dimitrov V., Borisova L., Nurutdinova I. Intelligent Support of Grain Harvester Technological Adjustment in the Field. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2019;875. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-01821-4\\_25](https://doi.org/10.1007/978-3-030-01821-4_25)
22. Omid M., Lashgari M., Mobli H., Alimardani R., Mohtasebi S., Hesamifard R. Design of Fuzzy Logic Control System Incorporating Human Expert Knowledge for Combine Harvester. *Expert Systems with Applications*. 2010;37(10):7080–7085. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.03.010>
23. Craessaerts G., Baerdemaeker de J., Missotten B., Saeys W. Fuzzy Control of the Cleaning Process on a Combine Harvester. *Biosystems Engineering*. 2010;106(2):103–111. <https://doi.org/10.1016/J.BIOSYSTEMSENG.2009.12.012>
24. Dimitrov V.P., Borisova L.V., Nurutdinova I.N. Method for Determining the Initial Values of the Adjustable Parameters of the Combine Harvester Cutting Unit. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(4):552–566. (In Russ, abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202204.552-566>  
Димитров В.П., Борисова Л.В., Нурутдинова И.Н. Метод определения начальных значений регулируемых параметров жатвенной части зерноуборочного комбайна. *Инженерные технологии и системы*. 2022;32(4):552–566. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202204.552-566>
25. Dimitrov V.P., Nurutdinova I.N., Papchenko A.A. Formation of a Knowledge Base for Selecting Parameter Values for the Working Parts of the TORUM Rotary Combine. *E3S Web of Conferences*. 2024;510:02001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202451002001>

*About the authors:*

**Valery P. Dimitrov**, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Quality Management, Don State Technical University (1 Gagarin Sq., Rostov-on-Don 344003, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1439-1674>, Researcher ID: E-4908-2018, Scopus ID: 57195505958, SPIN-code: 5991-4140, kaf-qm@donstu.ru

**Inna N. Nurutdinova**, Cand.Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Associate Professor of Department of Applied Mathematics, Don State Technical University (1 Gagarin Sq., Rostov-on-Don 344003, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3375-1295>, Researcher ID: HPF-3929-2023, Scopus ID: 57196043287, SPIN-code: 1139-1723, nurut.inna@yandex.ru

**Lyudmila V. Borisova**, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of Management Department Business-Processes, Don State Technical University (1 Gagarin Sq., Rostov-on-Don 344003, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6611-4594>, Researcher ID: E-4863-2018, Scopus ID: 7006547874, SPIN-код: 5718-9727, borisovalv09@mail.ru

**Alexey A. Papchenko**, Graduate Student of the Department of Quality Management, Don State Technical University (1 Gagarin Sq., Rostov-on-Don 344003, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-6436-8312>, Researcher ID: LFU-8208-2024, Scopus ID: 58989751000, SPIN-код: 1738-1144, paplexa99@mail.ru

*Authors contribution:*

V. P. Dimitrov – ideas; formulation or evolution of overarching research goals and aims; verification, whether as a part of the activity or separate, of the overall replication/reproducibility of results/experiments and other research outputs; preparation, creation and presentation of the published work, specifically writing the initial draft (including substantive translation).

I. N. Nurutdinova – application of statistical, mathematical, computational and other formal techniques to analyse study data; development of methodology; creation of models.

L. V. Borisova – linguistic description of the subject domain, modeling of fuzzy expert knowledge; preparation, creation and presentation of the published work, specifically visualization/data presentation.

A. A. Papchenko – conducting a research and investigation process, specifically performing the experiments and data/evidence collection; creation of a fuzzy production rules base, using a package of applied programs Fuzzy Logic Toolbox (MatLab) to solve problem.

*All authors have read and approved the final manuscript.*

*Submitted 11.09.2024; revised 27.09.2024; accepted 04.10.2024*

*Об авторах:*

**Димитров Валерий Петрович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой управления качеством Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1439-1674>, Researcher ID: E-4908-2018, Scopus ID: 57195505958, SPIN-код: 5991-4140, kaf-qm@donstu.ru

**Нурутдинова Инна Николаевна**, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры прикладной математики Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3375-1295>, Researcher ID: HPF-3929-2023, Scopus ID: 57196043287, SPIN-код: 1139-1723, nurut.inna@yandex.ru

**Борисова Людмила Викторовна**, доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой менеджмента и бизнес-процессов Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6611-4594>, Researcher ID: E-4863-2018, Scopus ID: 7006547874, SPIN-код: 5718-9727, borisovalv09@mail.ru

**Папченко Алексей Андреевич**, аспирант кафедры управления качеством Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-6436-8312>, Researcher ID: LFU-8208-2024, Scopus ID: 58989751000, SPIN-код: 1738-1144, paplexa99@mail.ru

*Заявленный вклад авторов:*

В. П. Димитров – формулирование идеи исследования, целей и задач; проверка воспроизводимости результатов экспериментов и исследования в рамках основных и дополнительных задач работы; создание и подготовка рукописи: написание черновика рукописи, включая его перевод на иностранный язык.

И. Н. Нурутдинова – применение статистических, математических, вычислительных и других формальных методов для анализа данных исследования; разработка методологии исследования; создание моделей.

Л. В. Борисова – лингвистическое описание предметной области, моделирование нечетких экспертных знаний; создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования и полученных данных.

А. А. Папченко – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор данных; создание базы нечетких продукционных правил, использование пакета прикладных программ Fuzzy Logic Toolbox (MatLab) для решения задачи.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*Поступила в редакцию 11.09.2024; поступила после рецензирования 27.09.2024; принята к публикации 04.10.2024*

**ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ /  
ELECTRICAL TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT**<https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202501.030-048>EDN: <https://elibrary.ru/cqtdbb>

УДК 631.344.8

ISSN Print 2658-4123

ISSN Online 2658-6525

<https://vestnik.mrsu.ru>*Оригинальная статья / Original article***Обоснование параметров активирования воды  
в электроактиваторе для полива растений****В. Ф. Сторчевой<sup>1</sup>✉, М. И. Белов<sup>3</sup>,  
А. В. Сторчевой<sup>2</sup>, П. М. Уманский<sup>3</sup>**<sup>1</sup>*Московский авиационный институт  
(г. Москва, Российская Федерация)*<sup>2</sup>*Российский биотехнологический университет  
(г. Москва, Российская Федерация)*<sup>3</sup>*Российский государственный аграрный университет –  
МСХА имени К. А. Тимирязева  
(г. Москва, Российская Федерация)*✉ [V\\_Storchevoy@mail.ru](mailto:V_Storchevoy@mail.ru)**Аннотация**

**Введение.** Многочисленные исследования показали, что обработка и полив растений активированной водой благоприятно влияют на их рост и урожайность, поэтому способы и методы подготовки такой воды весьма актуальны. В данной работе исследуется способ подготовки католита и анолита в так называемом проточном электроактиваторе, который устанавливается в автоматизированной системе полива растений в условиях теплиц и открытого грунта. Вода для полива растений должна иметь рекомендуемый в данных условиях водородный показатель, поэтому необходимо установить адекватную связь между режимом работы и рабочими параметрами электроактиватора с одной стороны и показателем уровня водорода в воде с другой. В настоящее время вопрос разработки адекватной математической модели активации воды в проточном электроактиваторе требует изучения. В статье предложена математическая модель, в которой установлена связь между показателем уровня водорода в воде, режимом активации и параметрами проточного электроактиватора.

**Цель исследования.** Повышение эффективности полива за счет рациональных параметров и режима работы проточного электроактиватора, обеспечивающего заданный показатель водорода католита или анолита на основе математической модели его работы.

**Материалы и методы.** Расчет параметров активирования воды в электроактиваторе осуществлялся с помощью математической модели электроактивации воды в проточном электроактиваторе на основе применения методов физической и электрической химии с использованием дифференциальных уравнений и расчетов в среде программирования Lazarus. Эксперименты для оценки адекватности модели проводились на разработанной экспериментальной установке.

**Результаты исследования.** Разработаны математическая модель активирования воды и экспериментальная установка, предназначенная для проверки адекватности математической модели. Обоснованы формулы, устанавливающие связи между водородным показателем активированной воды, параметрами проточного электроактиватора и параметрами его режима работы, необходимыми для разработки автоматизированной системы

© Сторчевой В. Ф., Белов М. И., Сторчевой А. В., Уманский П. М., 2025

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

полива растений. Установлено, что математическая модель активирования воды в электроактиваторе позволяет оценить водородный показатель с погрешностью менее 5 % при разности потенциалов между электродами не выше 125 В. При этом работа тока на нагревание и производство единицы вещества католита при заданном повышении водородного показателя тем ниже, чем меньше производительность катодной камеры. Теоретические исследования показали, что при заданном изменении водородного показателя мощность тока, расходуемая на нагрев католита, возрастает прямо пропорционально квадрату производительности катодной камеры, а энергоемкость производства единицы католита возрастает прямо пропорционально производительности катодной камеры. Экспериментально подтверждено, что значение pH изменяется параллельно с изменением температуры анолита и католита, прямо пропорционально разности потенциалов между электродами, обратно пропорционально производительности камер. При этом производительность катодной камеры с заданными параметрами целесообразно устанавливать не выше 15 л/ч, а температуру полива католиком – не выше 25 °С.

*Обсуждение и заключение.* Разработанная математическая модель подготовки воды в прочном электроактиваторе может служить основой автоматизированной системы полива растений, в которой требуется обеспечить подходящий режим работы в зависимости от заданного уровня водородного показателя воды.

**Ключевые слова:** электроактиватор, активированная вода, показатель водорода, уровень pH воды, анолит, католит

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Сторчевой В.Ф., Белов М.И., Сторчевой А.В., Уманский П.М. Обоснование параметров активирования воды в электроактиваторе для полива растений. *Инженерные технологии и системы.* 2025;35(1):30–48. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202501.030-048>

## Substantiation of the Parameters of Water Activation in an Electroactivator for Watering Plants

V. F. Storchevoy<sup>a</sup>✉, M. I. Belov<sup>c</sup>,

A. V. Storchevoy<sup>b</sup>, P. M. Umansky<sup>c</sup>

<sup>a</sup> *Moscow Aviation Institute (Moscow, Russian Federation)*

<sup>b</sup> *Russian Biotechnology University (Moscow, Russian Federation)*

<sup>c</sup> *Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev*

*Agricultural Academy (Moscow, Russian Federation)*

✉ [V\\_Storchevoy@mail.ru](mailto:V_Storchevoy@mail.ru)

### Abstract

*Introduction.* Numerous studies have shown that treating and watering plants with activated water have a beneficial effect on their growth and productivity that is why procedures and methods for preparing such water are very relevant. This work examines the method of preparing catholyte and anolyte in the so-called flow-type electroactivator, which is installed in an automated system for watering plants in greenhouses and open ground. Water for watering plants should have the pH index recommended for these conditions, so it is necessary to establish an adequate relationship between the operating mode and operating parameters of the electroactivator, on the one hand, and the pH index of water, on the other. At present, the issue of developing an adequate mathematical model for water activation in a flow-type electroactivator requires studying. The article proposes a mathematical model in which there is established relationship between the pH index of water, activation mode and flow-type electroactivator parameters.

*Aim of the Study.* The article is aimed at increasing the efficiency of an automated system for watering with activation of water in a flow-type electroactivator.

*Materials and Methods.* The calculation of the water activation parameters in the electroactivator was carried out using a mathematical model of the water electroactivation in a flow-type

electroactivator based on physical and electrical chemistry methods using differential equations and calculations in the Lazarus programming environment. The experiments to assess the adequacy of the model were carried out on a developed experimental facility.

*Results.* There have been developed a mathematical model of water activation and experimental facility to test the adequacy of the mathematical model. There are substantiated the formulas determining relationship between the pH index of activated water, parameters of a flow-type electroactivator and electroactivator operating mode parameters necessary for developing an automated plant watering system. It has been found that the mathematical model of water activation in an electric activator allows estimating the pH index with an error of less than 5% when the potential difference between the electrodes is not higher than 125 V. In this case, the work of the current to heat and produce a unit of catholyte substance for a specified increase in the pH index is less, the lower the productivity cathode chamber is. Theoretical studies have shown that for a specified change in the pH index, the current power spent on heating the catholyte increases in direct proportion to the square of productivity of the cathode chamber, and the energy intensity of producing a catholyte unit increases in direct proportion to the productivity of the cathode chamber. It has been confirmed experimentally that the pH index changes in parallel with changes in the temperature of the anolyte and catholyte, directly proportional to the potential difference between the electrodes, and inversely proportional to the performance of the chambers. In this case, it is advisable to set the productivity of the cathode chamber with the specified parameters no higher than 15 l/h, and the temperature of watering with catholyte no higher than 25°C.

*Discussion and Conclusion.* The developed mathematical model of water preparation in a flow-type electroactivator can serve as the basis for an automated plant watering system, in which it is necessary to ensure a suitable operating mode depending on the specified the pH index of water.

**Keywords:** electroactivator, activated water, hydrogen index, water pH level, anolyte, catholyte

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

**For citation:** Storchevoy V.F., Belov M.I., Storchevoy A.V., Umansky P.M. Substantiation of the Parameters of Water Activation in an Electroactivator for Watering Plants. *Engineering Technologies and Systems*. 2025;35(1):30–48. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202501.030-048>

**Введение.** Полив и обработка растений активированной водой оказывают благоприятное воздействие на растения и способствуют их росту и повышению урожайности [1; 2], поэтому способы и методы подготовки такой воды весьма актуальны [3; 4]. Работа посвящена исследованию способа подготовки активированной воды в виде католита и анолита в так называемом проточном электроактиваторе, предназначенном для установки в автоматизированной системе полива растений в условиях закрытого и открытого грунтов. Вода для полива растений должна иметь рекомендуемый в данных условиях водородный показатель, поэтому необходимо установить адекватную связь между режимом работы и рабочими параметрами электроактиватора с одной стороны и показателем уровня водорода в воде с другой. В настоящее время вопрос разработки адекватной математической модели активации воды в проточном электроактиваторе требует изучения.

Целью исследования является оценка рациональных параметров и режима работы проточного электроактиватора, обеспечивающего заданный показатель водорода католита или анолита на основе математической модели его работы. Для достижения цели нами разработана математическая модель активирования воды. При этом выведены формулы, устанавливающие связь между водородным показателем активированной воды, параметрами проточного электроактиватора и параметрами его режима работы. Это позволило обосновать рациональные

параметры активатора и режим работы, обеспечивающие заданный показатель водорода католита или анолита, рекомендуемый для полива данного растения в определенных условиях [5].

**Обзор литературы.** Использование активированной воды для полива благотворно влияет на растения. Полив салата активированной водой позволяет повысить его урожайность от 17,7 до 36,6 % [6]. Обработка растений электрохимическими активированными растворами индуцирует их устойчивость к болезням и вредителям [7; 8]. Наряду с обработкой растений электроактивированными растворами современным методом дезинфекции растений служит озонирование [9; 10]. При этом оба этих метода дополняют друг друга. Полив семян томатов катодной водой (католитом) увеличивает их прорастание на 11 %, а анодной водой (анолитом) – на 73 % в сравнении с поливом водопроводной водой [11]. Одним из эффективных способов подготовки активированной воды в процессе ее использования для полива служит разделение ее на два потока с пропусканием через две разделенные мембраной камеры проточного электроактиватора. Изучение вопроса теоретического обоснования связи между водородным показателем в камерах для подготовки активированной воды, параметрами активатора и режимом работы осуществляется методами физической и электрической химии и не учитывает подвижности потока. При этом в физической химии показатель водорода определяется через концентрации ионов водорода в камерах<sup>1</sup>, а в электрической химии – через плотности компонентов смеси<sup>2</sup>. Установление связи между этими концепциями представляется важным вопросом. Предлагаемые в настоящее время расчетные формулы зависимости показателя водорода в камерах активатора от рабочих параметров недостаточно обоснованы. Так, нельзя признать достаточно состоятельной исходную формулу для расчета скорости ионов при их движении через мембрану [12]. Также без должного обоснования предложена формула зависимости мощности тока от разности показателей водорода в камере активатора на выходе и входе [13]. Аналогичная формула зависимости мощности тока в активаторе от разности показателей водорода в камере используется без достаточного подтверждения [14]. Требуется доработки и алгоритм расчета параметров активатора [15].

Существующие установки для получения дезинфицирующих растворов имеют ряд недостатков. Например, устройства [16; 17], содержащие одну электрохимическую ячейку, выполненную из электродов, размещенных в электродных камерах и разделенных между собой диафрагмой. Недостатками таких устройств являются их сложность, низкие производительность и дезинфицирующее действие получаемых растворов. Устройство [18] для получения дезинфицирующего раствора, содержащее электрохимическую ячейку, выполненную из вертикальных стержневых электродов с полупроницаемой диафрагмой, разделяющей ячейку на анодную и катодную камеры, генератор озона с компрессором, имеет недостатки: отсутствие контроля концентрации озона раствора и водородного его показателя, ручное ее регулирование, периодичность работы устройства, отсутствие обеззараживания растений и автоматического полива для стимуляции и ускорения роста.

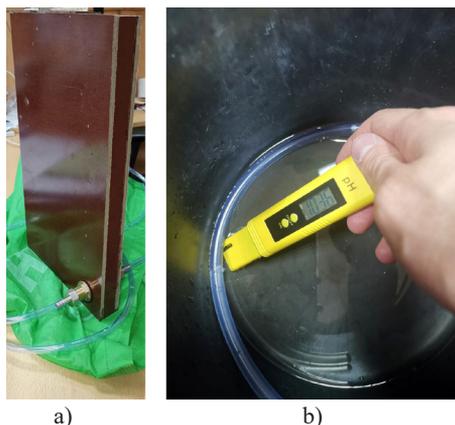
<sup>1</sup> Ньюмен Дж. Электрохимические системы. М. : Мир, 1977. 464 с.; Левич В. Г. Физико-химическая гидродинамика. 2-е изд., доп. и перераб. М. : ГИФМЛ, 1959. 700 с.

<sup>2</sup> Седов Л. И. Механика сплошной среды. М. : Наука, 1970. Т. 1. 492 с.; Герц Г. Г. Электрохимия. Новые воззрения / пер. с англ. В. Щербакова. М. : Мир, 1983. 232 с.

Предлагаемое нами техническое решение – установка генерации воды с заданными водородным показателем и уровнем насыщения озоном [19] – устраняет выявленные недостатки и позволяет получать качественные показатели раствора для дезинфекции, стимуляции роста и полива выращиваемых растений.

**Материалы и методы.** Теоретические исследования проведены методами механики сплошных сред, физической химии и электрической химии.

Эксперименты для оценки адекватности модели проводились на разработанной экспериментальной установке [15] – камере электроактивации воды проточного электроактиватора (рис. 1а). Водородный показатель анолита и католита определялся рН-метром марки YIRYI EZ-9908 (рис. 1б).



Р и с. 1. Камера электроактивации воды проточного электроактиватора: а) электроактиватор; б) рН-метр YIRYI EZ-9908

F i g. 1. Water electroactivation chamber of flow-type electroactivator: а) electroactivator; б) pH meter YIRYI EZ-9908

*Источник:* фотографии сделаны М. И. Беловым при испытаниях электроактиватора в лаборатории кафедры автоматизации и роботизации РГАУ – МСХА имени К. А Тимирязева в 2023 г.

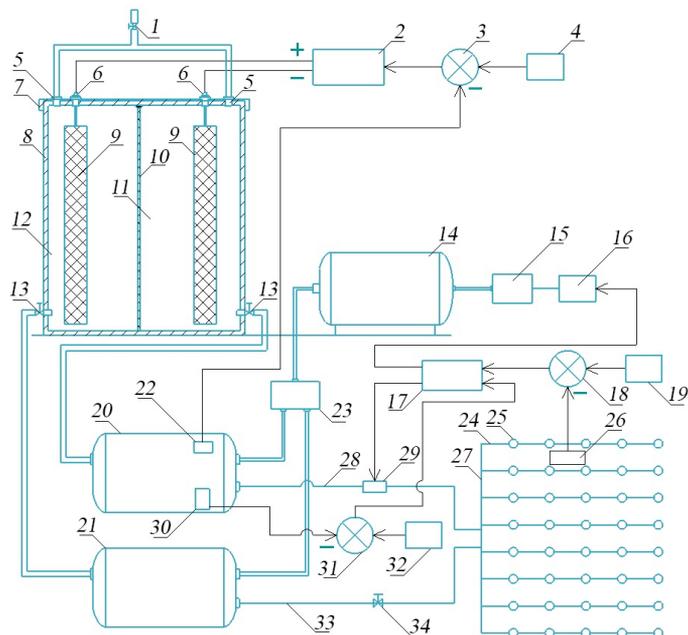
*Source:* photographs were taken by M. I. Belov when testing an electroactivator in the laboratory of the Department of Automation and Robotization of the Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy in 2023.

Разность потенциалов между электродами в экспериментах устанавливалась реостатом. Производительность анодной или катодной камеры регулировалась выпускным вентилем и регистрировалась с помощью мерной посуды с известным объемом  $V$  и секундомера, которым определялось время  $\Delta t$  наполнения мерной посуды. Производительность ( $Q$ , л/ч) рассчитывалась по следующей формуле:

$$Q = 3\,600\ V/\Delta t, \text{ л/ч.}$$

**Результаты исследования.** На рисунке 2 представлена установка генерации воды, позволяющая задавать значения водородного показателя и уровень насыщения озоном [5]. Основной задачей при подготовке анолита или католита с заданным водородным показателем служит автоматическое регулирование электродвижущей силы (ЭДС) источника питания и производительности катодной и анодной камер. Для решения этой задачи была разработана математическая

модель электроактивации воды, установлена связь ее водородного показателя с ЭДС источника питания конструктивными параметрами активатора и производительностью анодной и катодной камер.



Р и с. 2. Установка генерации воды с заданным водородным показателем и заданным уровнем насыщения озонном:

1 – кран подачи воды; 2 – источник регулируемого напряжения; 3 – элемент сравнения водородного показателя pH от датчика и заданного; 4 – блок задания pH; 5 – заливные отверстия; 6 – клеммы подключения источника питания к электродам; 7 – крышка камеры активатора; 8 – камера активатора; 9 – электроды; 10 – полупроницаемая диафрагма; 11 – катодная камера; 12 – анодная камера; 13 – краны регулировки расхода католита и анолита; 14 – генератор озона; 15 – компрессор; 16 – реле времени; 17 – микроконтроллер; 18 – блок сравнения влажности почвы; 19 – блок задания влажности почвы; 20 – емкость с католилитом; 21 – емкость с анолитом; 22 – датчик водородного показателя; 23 – стабилизатор концентрации озона; 24 – система капельного орошения; 25 – форсунка капельного полива; 26 – датчик влажности почвы; 27 – трубопровод для подачи в систему орошения; 28 – магистраль подачи католита; 29 – регулятор расхода католита; 30 – датчик концентрации озона в католите; 31 – устройство сравнения концентрации озона в католите с заданной; 32 – блок задания концентрации озона; 33 – магистраль подачи анолита; 34 – регулировка подачи анолита в систему орошения

Fig. 2. Installation of water generation with a specified pH index and a specified level of ozone saturation: 1 – water supply tap; 2 – adjustable voltage source; 3 – element for comparing the pH index from the sensor and specified pH index; 4 – pH setting unit; 5 – filler openings; 6 – terminals for connecting the power source to the electrodes; 7 – activator chamber cover; 8 – activator chamber; 9 – electrodes; 10 – semi-permeable diaphragm; 11 – cathode chamber; 12 – anode chamber; 13 – taps for adjusting the flow of catholyte and anolyte; 14 – ozone generator; 15 – compressor; 16 – time relay; 17 – microcontroller; 18 – soil moisture comparator; 19 – unit for setting soil moisture; 20 – container with catholyte; 21 – container with anolyte; 22 – pH index sensor; 23 – ozone concentration stabilizer; 24 – drip irrigation system; 25 – drip irrigation nozzle; 26 – soil moisture sensor; 27 – pipeline for supplying to the irrigation system; 28 – catholyte supply line; 29 – catholyte flow regulator; 30 – sensor of ozone concentration in catholyte; 31 – unit for comparing the ozone concentration in the catholyte with the specified one; 32 – unit for setting ozone concentration; 33 – anolyte supply line; 34 – adjustment of anolyte supply to the irrigation system

Источник: рисунки 2, 3, 5 составлены авторами статьи.

Source: Figures 2, 3, 5 compiled by the authors of the article.

Для определения изменения концентрации ионов водорода в анодной камере воспользуемся следующими обозначениями:  $Oxy$  – прямоугольная система декартовых координат с началом на верхнем уровне воды между анодной и катодной камерами, осью  $Ox$ , направленной перпендикулярно плоскости электрода от анода к катоду, и осью  $Oy$ , направленной вниз;  $L$  – расстояние между фронтальными стенками камеры электроактиватора, м;  $L_a$  – расстояние между электродами, м;  $h$  – высота катодной и анодной камер, м;  $S$  – площадь рабочей поверхности катода или анода,  $m^2$ ;  $v_w$  – скорость частицы воды в камерах анода и катода, м/с;  $v_H, v_{OH}$  – скорость соответственно гидратированных иона водорода и гидроксид иона, м/с;  $u_H, u_{OH}$  – подвижность соответственно гидратированных иона водорода и гидроксид иона,  $m^2/(B \cdot c)$ ;  $C_H, C_{OH}$  – молярная концентрация соответственно иона водорода и гидроксид-иона, кмоль/ $m^3$ ;  $C_{Hk}, C_{OHk}$  – молярная концентрация соответственно иона водорода и гидроксид-иона в католите катодной камеры, кмоль/ $m^3$ ;  $C_{Ha}$  – молярная концентрация иона водорода в анолите анодной камеры, кмоль/ $m^3$ ;  $N$  – число Авогадро  $N = 6,022 \cdot 10^{23}$  1/моль;  $k_w$  – ионное произведение воды,  $(кмоль/м^3)^2$  ( $k_w = 10^{-14}$  при температуре 22 °C);  $pH$  – водородный показатель воды;  $pH_0$  – водородный показатель воды перед электроактивацией;  $pH_k, pH_a$  – водородный показатель соответственно католита и анолита;  $U$  – ЭДС источника питания, В;  $\eta$  – КПД источника питания;  $I$  – величина тока между электродами, А;  $R_k, R_a, R_d$  – сопротивление соответственно католита в катодной камере, анолита в анодной камере и диафрагмы между камерами, Ом;  $E_a, E_k$  – средняя напряженность электрического поля соответственно в анодной камере и катодной камере, В/м;  $Q$  – производительность анодной или катодной камеры при подготовке анолита или католита,  $m^3/с$ ;  $\Delta T_k, \Delta T_a$  – повышение температуры соответственно католита и анолита, °C;  $c_p$  – теплоемкость католита и анолита, Дж/(кг °K);  $\rho_w$  – удельное сопротивление воды при данной температуре, Ом·м;  $\alpha$  – пористость диафрагмы;  $l$  – толщина диафрагмы, м;  $\rho$  – плотность воды, кг/ $m^3$ .

В воде с малым содержанием солей главную роль при электроактивации выполняют продукты ее диссоциации [20]. Если считать диполи молекул воды, окружающие положительно заряженный ион водорода  $H^+$  и отрицательно заряженный гидроксид-ион  $OH^-$  гидратированными ионами водорода  $H^{+*}$  и гидроксид-иона  $OH^{*-}$ , то диссоциация молекул воды на ионы представляется в виде формулы [6]:



Избыток гидроксид-ионов (анионов) возникает вблизи катода и образует недостаток гидратированных ионов водорода  $H^+$ . Избыток ионов водорода (катионов) возникает вблизи анода и образует в свою очередь недостаток гидратированных гидроксид-ионов  $OH^-$ . По мере удаления от электрода концентрации катионов и анионов выравниваются.

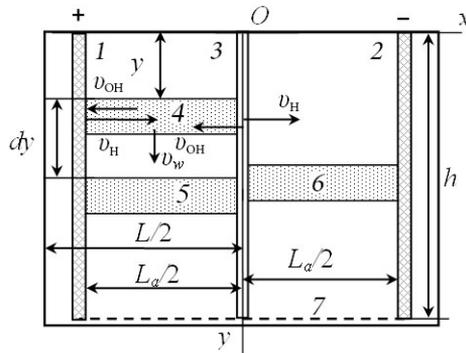
При электроактивации нейтральной воды в нормальных условиях анолит представляет собой кислую среду с водородным показателем ниже 7, католит – щелочную среду с водородным показателем выше 7. Имея повышенную химическую активность, католит стимулирует биологические процессы. Создавая

кислотную среду, анолит может служить антисептиком для растений, растущих в почве с нормальной кислотностью, или стимулятором роста растений, растущих в кислой почве.

Составим упрощенные уравнения неразрывности сплошной среды в анодной и катодной камерах. Принятым подходом при математической постановке такой задачи является составление уравнений неразрывности для многокомпонентных смесей. При этом неизвестными переменными служат концентрации ионов или плотности компонентов смеси. В частных задачах априорно предлагаются формулы, устанавливающие связь между водородным показателем и параметрами электроактивации [11]. При этом влияние ЭДС источника питания и водородного показателя исходной воды на водородный показатель анолита или католита не рассматривается. Под сплошной средой будем понимать смесь, состоящую из молекул воды, гидратированных ионов водорода (катионов) и гидратированных гидроксид-ионов (анионов). Полагаем, что ион движется под действием двух сил: силы Кулона, направленной перпендикулярно рабочей поверхности электродов, и силы Стокса вязкого сопротивления, направленной противоположно скорости иона. Гидратированный ион практически сразу достигает максимальной скорости и движется или передает движение по цепи с постоянной скоростью; скорости гидратированных ионов водорода  $v_H$  и гидроксид-ионов  $v_{OH}$  связаны с их подвижностями линейными зависимостями:

$$v_H = u_H E \quad v_{OH} = u_{OH} E. \quad (2)$$

Рассмотрим индивидуальный объем сплошной среды в анодной камере как элемент анолита между стенкой и диафрагмой в виде прямоугольного параллелепипеда объемом  $V_a$ , боковые грани которого имеют равные прямоугольники площадью  $S_a$  на стенке и диафрагме (рис. 3).



Р и с. 3. К расчету изменения концентрации ионов водорода в анодной камере:

1 – анод; 2 – катод; 3 – диафрагма;

4, 5 – элемент анолита анодной камеры в разные моменты времени;

6 – элемент католита катодной камеры; 7 – нижний уровень католита в катодной камере

F i g. 3. To calculate the change in the concentration of hydrogen ions in the anode chamber:

1 – anode; 2 – cathode; 3 – diaphragm;

4, 5 – anolyte element of the anode chamber at different times;

6 – catholyte element of the cathode chamber;

7 – lower level of catholyte in the cathode chamber

Единица измерения объема  $V_a$  совпадает с единицей объема для концентрации ионов. Полагаем, что на достаточно большом расстоянии от слива движение элемента поступательное со скоростью  $v_w$ :

$$v_w = \frac{2Qh}{LS}. \quad (3)$$

При выводе уравнений неразрывности компонентов смеси, то есть ионов, будем полагать, что масса компоненты смеси оценивается числом ионов в индивидуальном объеме, а скорость изменения массы компоненты смеси известна. Также примем следующие допущения: 1) изменение концентрации ионов в элементе происходит только за счет движения ионов через границы элемента с анодом и диафрагмой, движение через верхнюю и нижнюю границы со средой не влияет на концентрацию ионов в индивидуальном объеме; 2) влиянием на концентрацию ионов водорода в элементе анолита входящих в него через диафрагму гидроксид-ионов за время движения элемента в камере можно пренебречь; 3) влиянием на концентрацию гидроксид-ионов в элементе католита входящих в него через диафрагму ионов водорода за время движения элемента в камере можно пренебречь.

Пусть  $dt$  – бесконечно малое время, за которое рассматриваемый элемент переместится из положения 4 в положение 5 (рис. 3), а концентрация ионов водорода в его объеме изменится на бесконечно малую величину  $d(C_{Ha})$ . До перехода в элемент 4 находилось  $(10^3 \cdot N \cdot C_{Ha} \cdot V_a)$  ионов водорода и  $(10^3 \cdot N \cdot C_{OHa} \cdot V_a)$  гидроксид-ионов. За время  $dt$  через сечение элемента на аноде войдет  $(10^3 \cdot N \cdot C_{Ha} \cdot S_a \cdot v_H \cdot dt)$ , а через диафрагму выйдет  $(10^3 \cdot N \cdot C_{Ha} \cdot \alpha \cdot S_a \cdot v_H \cdot dt)$  ионов водорода. Очевидно, что изменение  $d(10^3 \cdot N \cdot C_{Ha} \cdot V_a)$  числа ионов водорода в элементе за время  $dt$  равно разности между числом вошедших в элемент и числом вышедших из элемента ионов водорода за это время:

$$d(NC_{Ha} V_a) = NC_{Ha} S_a v_H dt - NC_{Ha} \alpha S_a v_H dt$$

или, так как  $V_a = S_a \cdot L_a / 2$  и с учетом равенств (2),

$$\frac{L_a}{2} \cdot \frac{dC_{Ha}}{dt} = C_{Ha} u_H E_a (1 - \alpha). \quad (4)$$

За время  $dt$  элемент из положения 4 переместится вниз на расстояние  $dy$  и займет положение 5 (рис. 3). Очевидно, что

$$dt = \frac{dy}{v_w}$$

или, принимая во внимание равенство (3),

$$dt = \frac{LS}{2Qh} dy. \quad (5)$$

Заменив переменную  $t$  переменной  $y$  из уравнения (5), перепишем уравнение (4):

$$\frac{dC_{Ha}}{dy} = \frac{u_H E_a (1 - \alpha) SL}{L_a Qh} C_{Ha}. \quad (6)$$

Решение дифференциального уравнения (6) можно записать в таком виде:

$$C_{\text{Ha}} = k_1 e^{\frac{u_{\text{H}} E_a (1-\alpha) S L y}{L_a Q h}}, \quad (7)$$

где  $k_1$  – константа, равная концентрации  $C_{\text{Ha}}$  при  $y = 0$ .

Для определения константы  $k_1$  зададим краевое условие на верхнем уровне воды в камере, на котором водородный показатель воды, поступающей на электроактивацию, задан и равен  $\text{pH}_0$ . По определению<sup>3</sup>

$$\text{pH} = -\lg C_{\text{H}^+}. \quad (8)$$

Верхний уровень воды в активаторе представляется уравнением  $y = 0$ , в соответствии с определением (8) краевое условие решения (7) можно записать так:

$$\text{pH}_0 = -\lg(C_{\text{Ha}}|_{y=0}) = -\lg(k_1).$$

Отсюда

$$k_1 = 10^{-\text{pH}_0},$$

и решение (7) при  $y = h$ , то есть на выходе анолита из анодной камеры, можно представить в следующем виде:

$$C_{\text{Ha}} = 10^{-\text{pH}_0} e^{\frac{S u_{\text{H}} E_a (1-\alpha) L}{L_a Q}}. \quad (9)$$

За время  $dt$  через сечение аналогичного элемента  $b$  в катодной камере на катоде в элемент войдет ( $10^3 \cdot N \cdot C_{\text{ОНк}} \cdot S_a \cdot u_{\text{ОН}} \cdot E_k \cdot dt$ ), а через диафрагму выйдет ( $10^3 \cdot N \cdot C_{\text{ОНк}} \cdot \alpha \cdot S_a \cdot u_{\text{H}} \cdot E_a \cdot dt$ ) гидроксид-ионов. Изменение числа гидроксид-ионов в элементе за время  $dt$  равно разности между числом вошедших в элемент и числом вышедших из элемента гидроксид-ионов за это время:

$$d(NC_{\text{ОНк}}V_a) = NC_{\text{ОНк}}S_a u_{\text{ОН}} E_k dt - NC_{\text{ОНк}}\alpha S_a u_{\text{ОН}} E_k dt,$$

или

$$\frac{L_a}{2} \cdot \frac{dC_{\text{ОНк}}}{dt} = C_{\text{ОНк}} u_{\text{ОН}} E_k (1-\alpha). \quad (10)$$

Заменив переменную  $t$  переменной  $y$  из уравнения (5), перепишем уравнение (10):

$$\frac{dC_{\text{ОНк}}}{dy} = \frac{u_{\text{ОН}} E_k (1-\alpha) S L}{L_a Q h} C_{\text{ОНк}}. \quad (11)$$

Найдем концентрацию гидроксид-ионов на верхнем уровне воды в активаторе  $y = 0$ . Условие молярного равновесия реакции (1) для воды записывается как константа ионного произведения:

$$C_{\text{H}} C_{\text{ОН}} = k_w, \quad (12)$$

где  $k_w$  – константа ( $k_w = 10^{-14}$  при температуре воды 22 °С) с единицей измерения (моль/л)<sup>2</sup> или (кмоль/м<sup>3</sup>)<sup>2</sup>. Равенство (12) для католита имеет следующий вид:

$$C_{\text{Нк}} C_{\text{ОНк}} = k_w. \quad (13)$$

<sup>3</sup> Скорчеллетти В. В. Теоретическая электрохимия. Л. : Госхимиздат, 1963. 609 с.

Водородный показатель католита в катодной камере на верхнем уровне при  $y = 0$  задан и равен  $\text{pH}_0$ :

$$\text{pH}_0 = -\lg(C_{\text{Hk}|y=0}).$$

Используя равенство (13) и последнее равенство, запишем краевое условие для уравнения (11):

$$C_{\text{OHk}|y=0} = \frac{k_w}{10^{-\text{pH}_0}}. \quad (14)$$

Решение уравнения (11) с краевым условием (14) представим в следующем виде на выходе католита из катодной камеры при  $y = h$ :

$$C_{\text{OHk}} = k_w \cdot 10^{\text{pH}_0} e^{\frac{Su_{\text{OH}}E_k(1-\alpha)L}{L_aQ}}. \quad (15)$$

Подставляя решение (15) в равенство (13), найдем концентрацию ионов водорода на выходе из катодной камеры:

$$C_{\text{Hk}} = 10^{-\text{pH}_0} e^{\frac{-Su_{\text{OH}}E_k(1-\alpha)L}{L_aQ}}. \quad (16)$$

Равенство (8) для анолита записывается так:

$$\text{pH}_a = -\lg C_{\text{Ha}}$$

или, учитывая формулу (9),

$$\text{pH}_a = \text{pH}_0 - \frac{Su_{\text{H}}E_a(1-\alpha)L \lg e}{L_aQ}. \quad (17)$$

Формула (17) справедлива, если показатель  $\text{pH}_a$  не меньше 0. В противном случае показатель следует принимать равным 0.

Равенство (8) для католита записывается аналогично:

$$\text{pH}_k = -\lg C_{\text{Hk}}$$

или, учитывая формулу (16),

$$\text{pH}_k = \text{pH}_0 + \frac{Su_{\text{H}}E_k(1-\alpha)L \lg e}{L_aQ}. \quad (18)$$

Формула (18) справедлива, если показатель  $\text{pH}_k$  не превышает 14. В противном случае показатель следует принимать равным 14.

Запишем закон Ома в таком виде:

$$I = \frac{U\eta}{R_k + R_a + R_d}. \quad (19)$$

где

$$R_k = \frac{\rho_w L_a}{2S}; \quad R_a = \frac{\rho_w L_a}{2S}; \quad R_d = \frac{\rho_w l}{\alpha S}. \quad (20)$$

Среднюю напряженность электрического поля в анолите и католите между пластинами электродов оценим по следующим формулам [1]:

$$E_a = E_k = \frac{\rho_w I}{S}$$

или

$$E_a = E_k = \frac{\rho_w U \eta}{(R_k + R_a + R_d) S}. \quad (21)$$

Формулы (17), (18) устанавливают связь водородного показателя анолита и католита с водородным показателем воды до электроактивации, с конструктивными параметрами (геометрическими параметрами анодной и катодной камер, пористостью диафрагмы) и с регулируемыми параметрами (ЭДС источника питания, производительностью подготовки анолита и католита).

В соответствии с законом Джоуля-Ленца вся работа электрического тока в электролитах превращается в тепло. Повышение температуры католита и анолита можно оценить по следующим формулам:

$$\Delta T_k = \frac{R_k [U \eta / (R_k + R_a + R_d)]^2}{Q \rho c_p}, \quad (22)$$

$$\Delta T_a = \frac{R_a [U \eta / (R_k + R_a + R_d)]^2}{Q \rho c_p}. \quad (23)$$

Следует отметить, что на основании закона Джоуля-Ленца движение ионов, концентрация ионов, водородный показатель анолита и католита никак не связаны с работой и мощностью электрического тока. Тем самым движение ионов, концентрация ионов, водородный показатель являются процессами и характеристиками, на которые ток напрямую не влияет. Как следует из формул (17), (18), (21), водородный показатель зависит от разности потенциалов между электродами и от сопротивлений среды и не зависит от тока и мощности тока.

На основании установленных функциональных зависимостей между водородным показателем активированной воды и параметрами электроактиватора представим алгоритм расчета показателей активации воды:

1) ввод исходных данных:  $L$  [м],  $L_a$  [м],  $S$  [м<sup>2</sup>],  $u_H$  [м<sup>2</sup>/с В],  $u_{OH}$  [м<sup>2</sup>/с В],  $pH_0$ ,  $k_w$  [кмоль<sup>2</sup>/м<sup>6</sup>],  $Q$  [м<sup>3</sup>/с],  $\rho$  [кг/м<sup>3</sup>],  $U$  [В],  $\eta$ ,  $\rho_w$  [Ом·м],  $l$  [м],  $\alpha$ ,  $c_p$  [Дж/(кг·К)];

2) вычисление сопротивлений  $R_k$ ,  $R_a$ ,  $R_d$  по формулам (20);

3) вычисление величины тока по формуле (19);

4) расчет средней напряженности электрического поля в анолите и католите по формулам (21);

5) вычисление водородного показателя анолита по формуле (17);

6) вычисление водородного показателя католита по формуле (18);

7) вычисление величин изменения температуры католита  $\Delta T_k$  и анолита  $\Delta T_a$  соответственно по формулам (22) и (23).

Согласно алгоритму разработана компьютерная программа в среде Lazarus, позволяющая рассчитывать водородный показатель анолита и католита в зависимости от заданной ЭДС источника питания и производительности анодной и катодной камеры. Исходные данные для расчета представлены в таблице 1.

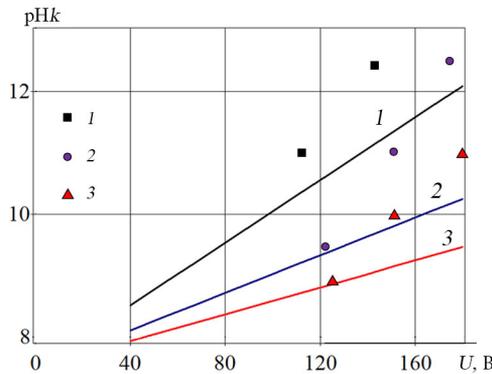
Таблица 1

Table 1

Исходные данные до приведения к системе СИ  
Initial data before reduction to the SI system

$L, \text{ мм} / L, \text{ mm}$	$L_a, \text{ мм} / L_a, \text{ mm}$	$S, \text{ см}^2 / S, \text{ sm}^2$	$l, \text{ мм} / l, \text{ mm}$	$Q, \text{ л/ч} / Q, \text{ l/h}$	$k_w, \text{ кмоль}^2/\text{м}^6 / k_w, \text{ kmol}^2/\text{m}^6$	$u_H \cdot 10^7, \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с}) / u_H \cdot 10^7, \text{ m}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$	$u_{OH} \cdot 10^7, \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с}) / u_{OH} \cdot 10^7, \text{ m}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$
62	40	561	2	15..35	$10^{-14}$	3,26	1,80
$U, \text{ В}$	$\rho, \text{ кг/м}^3 / \rho, \text{ kg/m}^3$	$\alpha$	$\eta$	$\rho_w, \text{ ом} \cdot \text{м} / \rho_w, \text{ ohm m}$	$c_p, \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{°К}) / c_p, \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{°К})$	$\text{pH}_0$	
40..160	1 000	0,15	0,98	1 600	4 180	7,0	

Исходя из представленных выше расчетов, сделали вывод, что математическая модель электроактивации воды в электроактиваторе позволяет оценить водородный показатель с точностью менее 5 % при разности потенциалов между электродами не выше 125 В. При разности потенциалов между электродами от 125 до 160 В точность модели снижается, относительная погрешность возрастает до 15 % (рис. 4).



Р и с. 4. График зависимости показателя водорода  $\text{pH}_k$  католита от разности потенциалов  $U$  между электродами при производительности катодной камеры с указанием экспериментальных точек:  
1 – 15 л/ч; 2 – 25 л/ч; 3 – 35 л/ч

F i g. 4. Graph of the dependence of the pH index of the catholyte on the potential difference  $U$  between the electrodes at the productivity of the cathode chamber, indicating the experimental points:  
1 – 15 l/h; 2 – 25 l/h; 3 – 35 l/h

Источник: составлено авторами статьи по материалам таблицы 2.

Source: compiled by the authors of the article based on materials from Table 2.

**Результаты экспериментов по определению основных параметров  
проточного электроактиватора**

**Results of experiments to determine the main parameters of a flow-type electroactivator**

№	Производительность по католиту, л/ч / Productivity by catholyte, l/hour	Изменение водородного показателя / Change in pH index	Водородный показатель католита / pH index of catholyte	Падение напряжения в катодной камере, В / Voltage drop in the cathode chamber, V	Напряжение между электродами, В / Voltage between electrodes, V
1	15	3,5	11,0	43,75	116
2	25	2,1	9,6	45,50	121
3	35	1,5	9,0	46,30	123
4	15	5,9	12,4	53,24	141
5	25	3,5	11,0	56,48	151
6	35	2,5	10,0	58,07	155
7	25	5,0	12,5	64,45	172
8	35	3,5	11,0	66,83	178

Анализ графиков на рисунке 4 и формул (18), (22) позволяет сделать следующий вывод: работа тока на нагревание и производство единицы вещества католита при заданном повышении водородного показателя тем ниже, чем меньше производительность катодной камеры. Действительно, пусть  $P_k$  – мощность тока, проходящего через католит,  $\Delta pH_k$  – изменение водородного показателя католита при электроактивации. По определению

$$R_k = I^2 R_k = R_k \left[ \frac{U \eta}{R_k + R_a + R_d} \right]^2. \quad (24)$$

Из формулы (18) с учетом (21) следует равенство:

$$U \eta = \frac{\Delta pH_k Q (R_k + R_a + R_d) L_a}{\rho_w u_{OH} (1 - \alpha) L l g e}. \quad (25)$$

Используя равенство (25), запишем формулу (24) для мощности тока:

$$P_k = \frac{R_k \Delta pH_k^2 Q^2 L_a^2}{[\rho_w u_{OH} (1 - \alpha) L l g e]^2}. \quad (26)$$

Из равенства (26) следует, что при заданном изменении водородного показателя мощность тока, расходуемая на нагрев католита, возрастает прямо пропорционально квадрату производительности катодной камеры, а энергоемкость производства единицы католита возрастает прямо пропорционально производительности катодной камеры. Аналогичный вывод можно сделать и по анолиту.

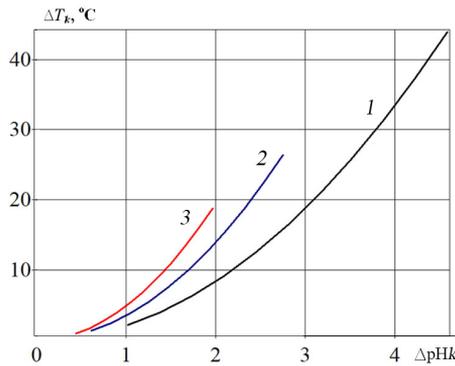
Переписывая формулу (22) с учетом (24), отметим, что изменение температуры католита прямо пропорционально удельной энергоемкости его производства:

$$\Delta T_k = \frac{P_k}{Q \rho c}. \quad (27)$$

или, учитывая формулу (26), квадрату изменения водородного показателя:

$$\Delta T_k = \frac{R_k \Delta \text{pH}_k^2 Q L_a^2}{\rho c_p [\rho_w u_{\text{OH}} (1 - \alpha) L l g e]^2} \quad (28)$$

Изменение водородного показателя на 2 единицы приводит к повышению температуры на 8 °С и выше при производительности камеры более 15 л/ч (рис. 5). Полагая, что температура воды перед электроактивацией равна 18 °С, во избежание полива католитом с температурой 25 °С и выше целесообразно устанавливать производительность не выше 15 л/ч с перерывом на охлаждение католита после изменения водородного показателя на 2 единицы.



Р и с. 5. Связь между повышением температуры  $\Delta T_k$  католита и изменением водородного показателя католита  $\Delta \text{pH}_k$  при производительности катодной камеры:

1 – 15 л/ч; 2 – 25 л/ч; 3 – 35 л/ч

F i g. 5. Relationship between an increase in the  $\Delta T_k$  temperature of the catholyte and a change in the pH index of the catholyte  $\Delta \text{pH}_k$  at a cathode chamber productivity:

1 – 15 l/hour; 2 – 25 l/hour; 3 – 35 l/hour

Графики на рисунке 5 отображают зависимость, описанную формулой (28), с учетом алгоритма и исходных данных в таблице 1.

**Обсуждение и заключение.** Математическая модель, представленная уравнениями (17)–(28), может служить основой при создании автоматизированной системы полива растений, оснащенной проточным электрическим активатором. Она позволяет по заданному показателю водорода воды, задаваемому пользователем как наиболее подходящему в данных условиях, рассчитать параметры и режим работы активатора, такие как ЭДС источника питания (разность потенциалов между электродами), производительность анодной и катодной камер, расстояние между электродами, длину камер, обеспечиваемую требуемое время активации и др. Тем самым достигается эффективность подготовки воды для полива с помощью технологии проточного электроактивирования. Рассматриваемая технология автоматизированного полива эффективна в условиях защищенного грунта, где может быть использована в течение года. При этом полученные результаты в равной мере справедливы и при установке такой системы в условиях открытого грунта. Математическая модель и эксперименты позволили сделать частные научные выводы. В соответствии с уравнением (25) водородный показатель изменяется

прямо пропорционально ЭДС и обратно пропорционально производительности. Расход электрической энергии на электроактивацию обусловлен нагреванием активированной воды и сопутствующими ее ионизацией и изменением водородного показателя. В соответствии с уравнением (27) температура анолита и католита изменяется прямо пропорционально мощности тока в камере и обратно пропорционально производительности камеры. В соответствии с уравнением (28) при неизменной производительности и изменении напряжения между электродами перемена температуры прямо пропорциональна квадрату изменения водородного показателя анолита или католита. Согласно графикам на рисунке 5 во избежание полива католитом с температурой 25 °С и выше производительность катодной камеры с заданными параметрами при преобразовании водородного показателя на 2,5 и более по шкале рН целесообразно устанавливать не выше 15 л/ч. Таким образом, полученная математическая модель позволит рассчитать параметры и режим работы активатора в разрабатываемых автоматизированных установках при их проектировании и эксплуатации на производстве и достичь эффективности подготовки воды для полива с помощью технологии проточного электроактивирования и озонирования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Оськин С.В., Волошин С.П. Особенности электроактиваторов для сельского хозяйства. *Сельский механизатор*. 2019;(1):26–27. EDN: VWLSHU  
Oskin S.V., Voloshin S.P. Features of Electroactivators for Agriculture. *Selskiy Mechanizator*. 2019;(1):26–27. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: VWLSHU
2. Ayebah B., Hung Y.-C., Frank J.F. Enhancing the Bactericidal Effect of Electrolyzed Water on *Listeria Monocytogenes* Biofilms Formed on Stainless Steel. *Journal of Food Protection*. 2005;68(7):1375–1380. <https://doi.org/10.4315/0362-028X-68.7.1375>
3. Oskin S., Tsokur D., Voloshin S. Modeling Process of Water Bubbling with Ozone to Obtain Disinfectant Solutions in Beekeeping. *Engineering for Rural Development*. 2019:1210–1214. <https://doi.org/10.22616/ERDev2019.18.N412>
4. Цокур Д.С. Математическая модель электроактиватора воды для системы стабилизации кислотности почвы при выращивании томатов в условиях закрытого грунта. *Научный журнал КубГАУ*. 2013;92(08):1–19. URL: <http://ej.kubagro.ru/2013/08/pdf/43.pdf> (дата обращения: 17.08.2024).  
Tsokur D.S. Mathematical Model of Electroactivator of Water for System Stabilization of Soil Acidity in Growing Tomatoes in Greenhouse. *KubGAU Scientific Journal*. 2013;92(08):1–19. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <http://ej.kubagro.ru/2013/08/pdf/43.pdf> (accessed 17.08.2024).
5. Storchevoy V., Gurov D. Investigation of the Modes of Operation of an Electroactivator for Disinfection of Vegetable Plants. *Fundamental and Applied Scientific Research in the Development of Agriculture in the Far East (AFE-2022)*. 2024:1325–1331. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-37978-9\\_129](https://doi.org/10.1007/978-3-031-37978-9_129)
6. Гриднева Т.С., Иралиева Ю.С., Нугманов С.С. Влияние электроактивированной воды при поливе на состав и продуктивность листового салата. *Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии*. 2016;(4):32–35. <https://doi.org/10.12737/21801>  
Gridneva T.S., Iralieva Yu.S., Nugmanov S.S. The Influence of Electroactivated Water by Watering for Composition and Productivity of Lettuce. *Bulletin Samara State Agricultural Academy*. 2016;(4):32–35. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.12737/21801>
7. Белицкая М.Н., Нефедьева Е.Э., Шайхиев И.Г. Электроактивированная вода: возможности использования в растениеводстве. *Вестник Казанского технологического университета*. 2014;24:124–128. URL: <https://clck.ru/3Ftbat> (дата обращения: 15.08.2024).

- Belitskaya M.N., Nefedyeva E.E., Shaikhiyev I.G. [Electroactivated Water: Possibilities of use in Crop Production]. *Bulletin of Kazan Technological University*. 2014;24:124–128. (In Russ.) Available at: <https://clck.ru/3Ftbat> (accessed 15.08.2024).
8. Белопухов С.Л., Дмитриевская И.И., Прохоров И.С., Сторчевой В.Ф. Активированные защитно-стимулирующие комплексы для обработки семян льна-долгунца. *Научная жизнь*. 2016;(2):75–83. EDN: [VXMJSV](https://doi.org/10.26907/2542-4552.2016.2.75-83)  
Belopukhov S.L., Dmitrevskaya I.I., Prokhorov I.S., Storchevoy V.F. Activated Protective-Stimulating Complexes for the Treatment of Flax Seeds. *Scientific Life*. 2016;(2):75–83. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: [VXMJSV](https://doi.org/10.26907/2542-4552.2016.2.75-83)
9. Шилов Г.Ю. Современные методы дезинфекции салатных культур, овощей и фруктов. *Пищевая промышленность*. 2013;(8):13–17. URL: <https://clck.ru/3Ftbnn> (дата обращения: 15.08.2024).  
Shilov G.Y. Modern Methods of Disinfection of Salad Crops, Vegetables and Fruits. *Food Industry*. 2013;(8):13–17. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://clck.ru/3Ftbnn> (accessed 15.08.2024).
10. Барабаш В.И. Применение озонированной воды для полива растений. *Colloquium-Journal*. 2021;4(91):33–34 <https://doi.org/10.24412/2520-6990-2021-491-33-34>  
Barabash V.I. Application of Ozonized Water for Irrigation of Plants. *Colloquium-Journal*. 2021;4(91):33–34. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.24412/2520-6990-2021-491-33-34>
11. Судаченко В.Н., Мишанов А.П. Эффективность использования активированной воды для полива и минеральной подкормки растений в теплице. *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*. 2003;73:106–110. URL: <https://clck.ru/3Ftdga> (дата обращения: 16.08.2024).  
Sudachenko V.N., Mishanov A.P. [Efficiency of Using Activated Water for Irrigation and Mineral Fertilization of Plants in a Greenhouse]. *Technologies and Technical Means of Mechanized Production of Crop and Livestock Products*. 2003;73:106–110. (In Russ.) Available at: <https://clck.ru/3Ftdga> (accessed 16.08.2024).
12. Ксенз Н.В., Кияшко Е.А., Сидорцов И.Г. Расчет водородного показателя (рН) при электролизе воды. *Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки*. 2012;(5):56–57. URL: <https://clck.ru/3FtduU> (дата обращения: 16.08.2024).  
Ksenz N.V., Kiyashko E.A., Sidortsov I.G. [Calculation of the Hydrogen Index (pH) During Electrolysis of Water]. *Izvestiya Vuzov. Severo-Kavkazskij Region. Estestvennye Nauki*. 2012;(5):56–57. (In Russ.) Available at: <https://clck.ru/3FtduU> (accessed 16.08.2024).
13. Оськин С.В., Курченко Н.Ю. Разработка математической модели электроактиватора с учетом данных о качестве воды и требований к рабочему раствору гербицида. *Научный журнал КубГАУ*. 2015;107. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-matematicheskoy-modeli-elektroaktivatora-s-uchetom-dannyh-o-kachestve-vody-i-trebovaniy-k-rabochemu-rastvoru-gerbitsida> (дата обращения: 16.08.2024).  
Oskin S.V., Kurchenko N.Yu. [Development of a Mathematical Model of an Electroactivator Based on Water Quality Data and Requirements for a Working Herbicide Solution]. *KubGAU Scientific Journal*. 2015;107. (In Russ.) Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-matematicheskoy-modeli-elektroaktivatora-s-uchetom-dannyh-o-kachestve-vody-i-trebovaniy-k-rabochemu-rastvoru-gerbitsida> (accessed 16.08.2024).
14. Сторчевой В.Ф., Гуров Д.А. Параметры режима работы электроактиватора для дезинфекции и роста овощных растений. *Агроинженерия*. 2023;25(2):63–68. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-2-63-68>  
Storchevoy V.F., Gurov D.A. Parameters of the Operation Mode of the Electric Activator for Disinfection and Growth Support of Vegetable Plants. *Agroengineering*. 2023;25(2):63–68. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-2-63-68>
15. Сторчевой В.Ф., Кабдин Н.Е., Андреев С.А., Гуров Д.А. Моделирование рациональных режимов электроактиватора для обработки грубых кормов. *Агроинженерия*. 2022;24(3):80–86. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-80-86>  
Storchevoy V.F., Kabdin N.E., Andreev S.A., Gurov D.A. Simulating Rational Modes of Electric Activator for Rough Forage Processing. *Agroengineering*. 2022;24(3):80–86. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-80-86>

16. Мееркоп Г.Е., Дзейранишвили Н.В., Бутин С.К. Установка для электрохимической обработки жидкой среды (варианты). Патент 2119802 Российская Федерация. 18 октября 1998. EDN: **VFDSSR**  
Meerkop G.E., Dzhejranishvili N.V., Butin S.K. Device for Performing Electrochemical Treatment of Liquid Media. Patent 2,119,802 Russian Federation. 1998 October 18. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **VFDSSR**
17. Прохоров В.А., Поплавский В.М., Абрамов В.Г., Землеруб Ю.В. Устройство для получения моющих и дезинфицирующих растворов. Патент 2238909 Российская Федерация. 27 октября 2004. EDN: **MKYOQS**  
Prokhorov V.A., Poplavskiy V.M., Abramov V.G., Zemlerub Yu.V. Apparatus for Producing of Washing and Disinfecting Solutions. Patent 2,238,909 Russian Federation. 2004 October 27. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **MKYOQS**
18. Овсянников Д.А., Волошин А.П., Цокур Д.С., Дуданец Д.Н., Потапенко Л.В. Устройство для получения дезинфицирующего раствора. Патент 2494975 Российская Федерация. 10 октября 2013. EDN: **IRMTLN**  
Ovsjannikov D.A., Voloshin A.P., Tsokur D.S., Dudanets D.N., Potapenko L.V. Device for Obtaining Disinfectant Solution. Patent 2,494,975 Russian Federation. 2013 October 10. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **IRMTLN**
19. Сторчевой В.Ф., Гуров Д.А., Судник Ю.А., Белов М.И., Кабдин Н.Е., Андреев С.А. Устройство для получения раствора для дезинфекции, стимуляции роста и полива выращиваемых растений. Патент 2814191 Российская Федерация. 26 февраля 2024. EDN: **WOXGVG**  
Storchevoj V.F., Gurov D.A., Sudnik Yu.A., Belov M.I., Kabdin N.E., Andreev S.A. Device for Obtaining Solution for Disinfection, Growth Stimulation and Watering of Cultivated Plants. Patent 2,814,191 Russian Federation. 2024 February 26. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **WOXGVG**
20. Семенов С.Я., Чушкин А.Н., Лытов М.Н. Закономерности релаксации воды с электрохимически измененным окислительно-восстановительным потенциалом. *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование*. 2017;2(46):263–271. EDN: **ZRTDLT**  
Semenenko S.Ya., Chushkin A.N., Lytov M.N. The Law of Relaxation of Water with Electrochemically Modified Redox Potential. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo Agrouniversitetskogo Kompleksa: Nauka i Vysshee Professional'noe Obrazovanie*. 2017;2(46):263–271. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **ZRTDLT**

*Об авторах:*

**Сторчевой Владимир Федорович**, доктор технических наук, профессор кафедры теоретической электротехники Московского авиационного института (125993, Российская Федерация, г. Москва, Волоколамское ш., д. 4), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6929-3919>, Researcher ID: **ABB-9545-2021**, [V\\_Storchevoy@mail.ru](mailto:V_Storchevoy@mail.ru)

**Белов Михаил Иванович**, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизации и роботизации технологических процессов имени академика И. Ф. Бородина Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К. А. Тимирязева (127434, Российская Федерация, г. Москва, Тимирязевская ул., д. 49), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9907-8825>, Researcher ID: **T-5622-2018**, [V-Mikhael@yandex.ru](mailto:V-Mikhael@yandex.ru)

**Сторчевой Александр Владимирович**, старший преподаватель кафедры социально-гуманитарных дисциплин Российского биотехнологического университета (125080, Российская Федерация, г. Москва, Волоколамское ш., д. 11), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3404-0361>, [alecks.10@mail.ru](mailto:alecks.10@mail.ru)

**Уманский Петр Михайлович**, старший преподаватель кафедры автоматизации и роботизации технологических процессов имени академика И. Ф. Бородина Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К. А. Тимирязева (127434, Российская Федерация, г. Москва, Тимирязевская ул., д. 49), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8109-4026>, Researcher ID: **AAE-6933-2022**, [umpm@rambler.ru](mailto:umpm@rambler.ru)

*Заявленный вклад авторов:*

В. Ф. Сторчевой – контроль, лидерство и наставничество в процессе планирования и проведения исследования; сравнительный анализ конструкций; определение эффективной конструкции установки генерации воды с заданным водородным показателем и заданным уровнем насыщения озонем; создание математической модели; формулировка выводов.

М. И. Белов – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов, сбор данных; создание математической модели и расчет камеры проточного электроактиватора воды.

А. В. Сторчевой – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов, сбор данных; анализ существующих установок для генерации воды с заданным водородным показателем и заданным уровнем насыщения озонем.

П. М. Уманский – проверка воспроизводимости результатов экспериментов и исследования в рамках основных или дополнительных задач работы; создание и подготовка рукописи: написание черновика рукописи, включая его перевод на иностранный язык.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*Поступила в редакцию 13.09.2024; поступила после рецензирования 26.09.2024; принята к публикации 07.10.2024*

*About the authors:*

**Vladimir F. Storchevoy**, Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Department of Theoretical Electrical Engineering, Moscow Aviation Institute (4 Volokolamsk Shosse, Moscow 125993, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6929-3919>, Researcher ID: [ABB-9545-2021](https://orcid.org/0000-0001-9907-8825), [V\\_Storchevoy@mail.ru](mailto:V_Storchevoy@mail.ru)

**Mikhail I. Belov**, Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Department of Automation and Robotization of Technological Processes named after Academician I. F. Borodin, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (49 Timiryazevskaya St., Moscow 127434, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9907-8825>, Researcher ID: [T-5622-2018](https://orcid.org/0000-0003-3404-0361), [B-Mikhael@yandex.ru](mailto:B-Mikhael@yandex.ru)

**Alexander V. Storchevoy**, Senior Lecturer of the Department of Social and Humanitarian Disciplines, Russian Biotechnology University (11 Volokolamskoe Shosse, Moscow 125080, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3404-0361>, [alecks.10@mail.ru](mailto:alecks.10@mail.ru)

**Peter M. Umansky**, Senior Lecturer of the Department of Automation and Robotization of Technological Processes named after Academician I. F. Borodin, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (49 Timiryazevskaya St., Moscow 127434, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8109-4026>, Researcher ID: [AAE-6933-2022](https://orcid.org/0000-0001-8109-4026), [umpm@rambler.ru](mailto:umpm@rambler.ru)

*Authors contribution:*

V. F. Storchevoy – supervision and leadership responsibility in planning and conducting the study, conducting the comparative analysis of units, determining an effective design for the unit for generating water with a specified pH index and a specified ozone saturation level, creating a mathematical model, and formulating the conclusions.

M. I. Belov – conducting the study, performing the experiments, collecting the data, creating a mathematical model and calculating the parameters for the chamber of a flow-type water electroactivator.

A. V. Storchevoy – conducting the study, performing the experiments, collecting the data, analyzing the existing installations for generating water with a specified pH index and a given level of ozone saturation.

P. M. Umansky – verifying reproducibility of the results of the experiments within the framework of the main or additional tasks of the study, preparing the manuscript: writing the initial manuscript draft (including translating into The English language).

*All authors have read and approved the final manuscript.*

*Submitted 13.09.2024; revised 26.09.2024; accepted 07.10.2024*

**ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ /  
ELECTRICAL TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT**<https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202501.049-059>EDN: <https://elibrary.ru/ghqmlg>

УДК 697.1:536.2

ISSN Print 2658-4123

ISSN Online 2658-6525

<https://vestnik.mrsu.ru>*Оригинальная статья / Original article***Теплопередача однотрубной системы отопления  
при реверсивной подаче теплоносителя****А. П. Левцев<sup>1</sup>✉, Е. С. Лапин<sup>1</sup>,****И. И. Лысяков<sup>1</sup>, Д. Чжень<sup>2</sup>**<sup>1</sup> *Национальный исследовательский  
Мордовский государственный университет  
(г. Саранск, Российская Федерация)*<sup>2</sup> *Цзянсуский университет науки и технологии  
(г. Чжэньцзян, Китай)*✉ [levtzevap@mail.ru](mailto:levtzevap@mail.ru)**Аннотация**

*Введение.* В традиционном режиме теплопередача однотрубных систем отопления значительно уступает двухтрубным. С развитием импульсных технологий в системах теплоснабжения стало возможным создание реверсивного режима подачи теплоносителя, в котором теплопередача отопительных приборов улучшается за счет пульсации теплоносителя, однако коэффициент теплопередачи во многом зависит от технологических решений создания такого режима. В связи с этим создание оригинальной технологической схемы для реверсивного режима на базе мембранного насоса и обоснование оптимального частотного диапазона его работы является актуальным и практически значимым для развития однотрубных систем отопления.

*Цель исследования.* Повышение эффективности работы однотрубных систем отопления с помощью создания реверсивного режима подачи теплоносителя с использованием мембранного насоса.

*Материалы и методы.* При установке экспериментальных зависимостей перепада температур для греющего и нагреваемого контуров отопления реверсивной теплопередачи по одной трубе от частоты пульсаций расхода теплоносителя при разных входных температурах в динамике использовались методы цепей, физического эксперимента, математической статистики. Физический эксперимент проводился последовательно при повышении и понижении температуры теплоносителя (50 и 60 °С).

*Результаты исследования.* На лабораторной установке реверсивной теплопередачи по одной трубе получена оптимальная частота для двух температур теплоносителя, обеспечивающая повышение перепада температур в контурах и коэффициент теплопередачи. Получены зависимости перепада температур для греющего (внешнего) и нагреваемого (внутреннего) контура теплоснабжения, а также коэффициента теплопередачи для теплообменника от частоты хода диафрагмы мембранного насоса.

*Обсуждение и заключение.* В результате проведения физического эксперимента установлено, что передача тепловой энергии по одной трубе возможна в широком диапазоне частот, при этом наибольшая теплопередача зафиксирована на

© Левцев А. П., Лапин Е. С., Лысяков И. И., Чжень Д., 2025

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

частоте 0,3–0,4 Гц. Таким образом, технология теплопередачи по одной трубе может успешно применяться для отопления мест общего пользования в многоквартирных домах, общежитиях, промышленных, сельскохозяйственных объектах и зданиях индивидуальной жилой постройки.

**Ключевые слова:** система отопления, пульсирующий режим, реверсивное движение, физический эксперимент, перепад температур, коэффициент теплопередачи

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Левцев А.П., Лапин Е.С., Лысяков И.И., Чжень Д. Теплопередача однотрубной системы отопления при реверсивной подаче теплоносителя. *Инженерные технологии и системы*. 2025;35(1):49–59. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202501.049-059>

## Investigation of Reversible Heat Transfer in a One-Pipe Heating System

A. P. Levtshev<sup>a</sup>✉, E. S. Lapin<sup>a</sup>,  
I. I. Lysyakov<sup>a</sup>, D. Chen<sup>b</sup>

<sup>a</sup> National Research Mordovia State University  
(Saransk, Russian Federation)

<sup>b</sup> Jiangsu University of Science and Technology  
(Zhenjiang, China)

✉ [levtzevap@mail.ru](mailto:levtzevap@mail.ru)

### Abstract

**Introduction.** With the standard mode, heat transfer in one-pipe heating systems is significantly inferior to heat transfer in two-pipe systems. The development of pulse technologies for heating systems made it possible to create a reversible heat transfer in which heat transfer in heating devices is improved through the heat transfer agent pulsation, but the heat transfer coefficient depends largely on technological solutions for creating this reversing mode. In this connection, developing original technological scheme for reversible heat transfer based on the diaphragm pump and substantiating optimal frequency range of its operation is relevant and practically important for improving one-pipe heating systems.

**Aim of the Study.** The study is aimed at increasing the efficiency of one-pipe heating systems through creating reversible heat transfer agent supply using a diaphragm pump.

**Materials and Methods.** There were used the methods of circuits, physical experiment and mathematical statistics to establish experimental dependences of the temperature difference for the heating and heated circuits of reversible heat transfer through one pipe on the frequency of pulsations of the heat transfer agent flow at different inlet temperatures in dynamics. The physical experiment was carried out at two heat transfer agent temperatures (50 and 60°C).

**Results.** With the use of the laboratory setup for reversible heat transfer through one pipe, there have been found the optimal frequency for two heat transfer agent temperatures, providing an increase in the temperature difference in the circuits and the heat transfer coefficient. There have been found dependences of temperature difference for heating (external) and heated (internal) circuits of heat transfer and heat transfer coefficient for the heat exchanger on the pump diaphragm stroking rate.

**Discussion and Conclusion.** As a result of the physical experiment, it has been found that the heat energy transfer through one pipe is possible in a wide frequency range (from 0.15 to 0.4 Hz), while the greatest heat transfer is recorded at a frequency of 0.3–0.4 Hz. The technology of heat transfer through one pipe can be successfully used

for heating common areas in apartment buildings, dormitories, industrial and agricultural facilities, and individual residential buildings.

**Keywords:** heating system, pulsating mode, reverse motion, physical experiment, temperature difference, heat transfer coefficient

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

**For citation:** Levtsev A.P., Lapin E.S., Lysyakov I.I., Chen D. Investigation of Reversible Heat Transfer in a One-Pipe Heating System. *Engineering Technologies and Systems*. 2025;35(1):49–59. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202501.049-059>

**Введение.** Передача тепловой энергии в отопительных установках сопровождается технологическими потерями как тепловой, так и электрической энергии. Величину технологических потерь при передаче тепловой энергии по сетям для городских поселений в перспективе стараются ограничить на уровне 7 %. Однако фактическая ее величина пока остается высокой (16 % и более) [1]. Нормативная величина технологических потерь при передаче тепловой энергии зависит главным образом от исполнения тепловой сети (двухтрубная она или однотрубная). На практике получила распространение двухтрубная передача тепловой энергии, при которой горячий теплоноситель поступает к потребителю по подающему трубопроводу, а отработанный теплоноситель отводится по обратному трубопроводу [2]. Технологические потери здесь несут оба трубопровода, а расход труб по сравнению с однотрубными системами выше в два раза [3]. Вместе с тем в старой застройке и домах индивидуальной постройки еще не редко встречается однотрубная разводка, при которой отопительный прибор ставится в рассечку трубопровода, а отработанный теплоноситель возвращается по укороченному трубопроводу [4; 5], причем последний не всегда удачно вписывается в интерьер здания. В связи с этим однотрубная разводка редко применяется при реконструкции систем отопления зданий и новом строительстве [6].

С развитием импульсных технологий в системах тепло- и водоснабжения [7–9] стало возможной реверсивная передача тепловой энергии по одной трубе [10]. Теоретические основы такой теплопередачи изложены в работах [11–13]. Пульсирующее движение теплоносителя при этом осуществляется с помощью мембранного насоса [13], который для работы использует избыточный напор тепловой сети. Достаточно высокую надежность в работе и неплохие характеристики показали мембранные насосы с тарельчатыми диафрагмами [13–15]. Положительный опыт использования пульсирующего режима открывает новые возможности реализации реверсивной теплопередачи по одной трубе. При этом влияние пульсирующего режима мембранного насоса на теплопередачу при реверсивном движении теплоносителя не изучено. Таким образом, создание оригинальной технологической схемы для реверсивного режима на базе мембранного насоса и обоснование оптимального частотного диапазона его работы являются актуальными и практически значимыми задачами для развития однотрубных систем отопления.

В связи с этим целью данной работы стало исследование условий создания реверсивного движения теплоносителя в системе отопления с независимым подключением, а также получение экспериментальных зависимостей перепада

температур для греющего (внешнего) и нагреваемого (внутреннего) контура теплоснабжения и коэффициента теплопередачи для промежуточного теплообменника от частоты хода диафрагмы мембранного насоса. Последние позволяют выбрать рациональный режим реверсивной передачи тепловой энергии в однотрубных системах отопления с независимым подключением.

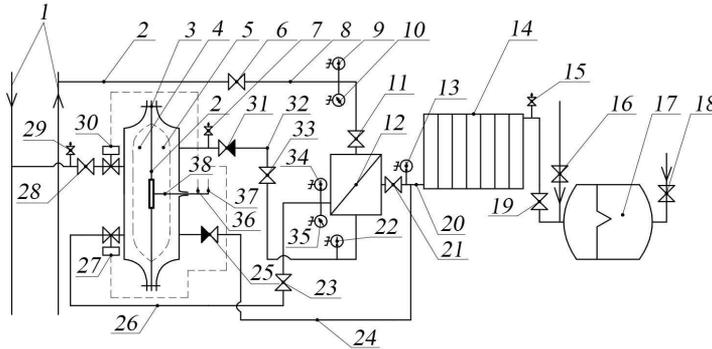
**Обзор литературы.** Однотрубные системы отопления широко используются в зданиях индивидуальной постройки, а также для отопления отдельных промышленных и сельскохозяйственных объектов (склады, гаражи, станции технического обслуживания и др.) благодаря своей простоте и надежности в работе [4; 5]. Практика эксплуатации таких систем показывает, что их потенциал в значительной степени не использован. Особенностью однотрубной системы отопления является то, что теплоноситель движется в одном направлении [16]. При встрече с отопительным прибором (ОП) только часть теплоносителя ответвляется к нему, а большая идет по основной трубе. Отработанный теплоноситель из ОП смешивается с основным потоком теплоносителя, при этом температура теплоносителя по ходу его движения уменьшается.

К преимуществам однотрубной системы отопления можно отнести простоту монтажа и обслуживания, не требующих высокой квалификации персонала; экономии расходных материалов для монтажа (труба, арматура и др.); эстетический внешний вид; возможность организации нескольких контуров [4; 17]. В качестве недостатков однотрубной системы можно отметить следующие: снижение температуры по ходу движения теплоносителя (у последнего ОП она будет ниже на  $1^\circ\text{C}$  и более); сложность регулирования температуры по отдельным помещениям; значительные затраты электроэнергии на привод насоса из-за необходимости поддержания повышенного расхода теплоносителя [6; 17].

Одним из действенных способов повышения эффективности однотрубных систем отопления и расширения их сферы использования является организация пульсирующего режима движения теплоносителя при независимом подключении ОП [10]. Суть данного изобретения заключается в использовании части напора тепловой сети для привода мембранного насоса, который создает в нагреваемом контуре пульсирующий реверсивный режим. При этом теплоноситель проходит ОП в двух направлениях: прямом и обратном. В обоих направлениях движения теплоносителя через ОП окружающему воздуху передается тепловая энергия. Мембранный насос управляется с помощью электромагнитного клапана в зависимости от положения мембраны. Расход теплоносителя в нагреваемом контуре однотрубной системы отопления зависит от объема диафрагмы и частоты привода мембранного насоса. В качестве мембранных насосов для систем отопления хорошо зарекомендовали себя мембранные насосы с тарельчатыми диафрагмами от тормозных систем автомобилей [13–15].

**Материалы и методы.** С целью нахождения рационального режима реверсивной передачи тепловой энергии по одной трубе была собрана экспериментальная установка, проведен физический эксперимент.

Экспериментальная установка для исследования реверсивной передачи тепловой энергии по одной трубе в пульсирующем режиме приведена на рисунке 1.



Р и с. 1. Принципиальная схема лабораторной установки:

- 1 – тепловая сеть; 2 – диафрагма мембранного насоса; 3 – мембранный насос;  
 4 – рабочая зона мембранного насоса внешнего контура; 5 – рабочая зона мембранного насоса внутреннего контура; 6, 11, 21, 23, 28, 33 – задвижки; 7, 15, 19, 29 – спускные вентили;  
 8, 24, 26, 32 – соединительные трубопроводы; 9, 13, 22, 34 – электро-датчики температуры;  
 10, 35 – электродатчики давления; 12 – теплообменник независимого подключения;  
 14 – радиатор воздушного отопления; 16, 18 – краны; 17 – гидроаккумулятор;  
 20 – реверсивный трубопровод; 27, 30 – электромагнитные клапан; 25, 31 – обратные клапана;  
 36, 37 – микропереключатели; 38 – шток мембранного насоса

Fig. 1. Schematic diagram of the laboratory setup:

- 1 – heating system; 2 – pump diaphragm; 3 – diaphragm pump; 4 – working area of the external circuit diaphragm pump; 5 – the working area of the diaphragm pump of the internal circuit;  
 6, 11, 21, 23, 28, 33 – gate valves; 7, 15, 19, 29 – drain valves; 8, 24, 26, 32 – connecting pipelines;  
 9, 13, 22, 34 – electro-temperature sensors; 10, 35 – electro-pressure sensors;  
 12 – independent connection heat exchanger; 14 – radiator for air heating; 16, 18 – cranes;  
 17 – hydraulic accumulator; 20 – reversible pipeline; 27, 30 – solenoid valves; 25, 31 – check valves;  
 36, 37 – microswitches; 38 – the stem of the diaphragm pump;

Источник: составлено авторами статьи по материалам [10].

Source: the diagram is compiled by the authors of the article based on the materials [10].

Теплоноситель забирается из тепловой сети через открытый электромагнитный клапан 30 и поступает в рабочую камеру 4 мембранного насоса 3, где за счет трансформации напора тепловой сети через диафрагму 2 мембранного насоса 3 создается давление в рабочей камере мембранного насоса 3 со стороны потребителя тепловой энергии 5, которое способствует вытеснению порции теплоносителя из рабочей камеры. Передав напор и изменив положение штока 38, после получения сигнала с микропереключателя 37 открывается электромагнитный клапан 27. Теплоноситель через соединительный трубопровод 26 поступает в теплообменник независимого подключения 12, где происходит процесс теплопередачи от теплоносителя внешнего контура к внутреннему контуру установки. Далее через соединительный трубопровод 8 отработанный теплоноситель возвращается в тепловую сеть 1. Во внутреннем контуре движение теплоносителя после смещения диафрагмы идет через соединительный трубопровод 24, минуя обратный клапан 31. При этом теплоноситель поступает в теплообменник независимого подключения 12, где происходит передача тепловой энергии от теплоносителя внешнего контура. Затем через реверсивный трубопровод 20 теплоноситель поступает в секционный радиатор 14, где передает тепловую энергию в окружающую среду. В последующем он поступает в гидроаккумулятор 17, повышая давление в нем. При повышении давления в гидроаккумуляторе 17 свыше

предельного во внутренней системе начинается обратный ход штока 38, теплоноситель возвращается назад в рабочую камеру мембранного насоса со стороны потребителя 6, проходя через реверсивный трубопровод 20 и через соединительный трубопровод 24, взаимодействуя с обратным клапаном 25. При этом шток возвращается в исходное положение и, взаимодействуя с микропереключателем 36, отдает сигнал на перекрытие электромагнитного клапана 27 и открытие электромагнитного клапана 30. Заполнение системы водой происходит через кран 16. Заполнение гидроаккумулятора воздухом обеспечивается за счет крана 18. Для сбора расчетных данных экспериментальной установки используются датчики температуры 9, 13, 22, 34 и датчики давления 10, 35. Для обеспечения эксплуатации и ремонта установки также установлены задвижки 6, 11, 21, 23, 28, 33. Воздух из системы удаляется путем открытия спускных вентилей в верхних точках установки 15, 19, 29.

Проведение эксперимента осуществлялось по методике, которая включала последовательность следующих шагов:

1. Подключались датчики температуры 9, 13, 22, 34 и давления 10, 35 к компьютеру для сбора данных с экспериментальной установки.

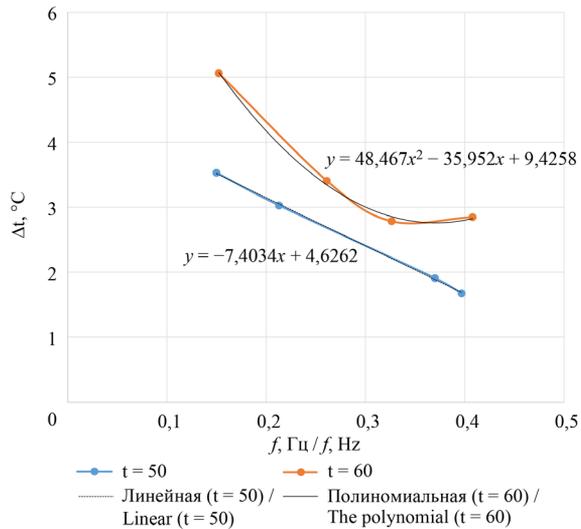
2. Производилось заполнение внутреннего контура теплоснабжения теплоносителем открытием задвижек 19, 21, 33, а также крана заполнения системы водой 16. После создания давления во внутренней системе открывались спускные вентили 7, 15, удалялся воздух из системы. При этом диафрагма насоса смещалась в крайнее положение, замыкая микропереключатель 36. Спускные вентили 7, 15 прикрывались. Кран заполнения системы водой 16 закрывался. Включался компрессор и открывался кран заполнения воздухом диафрагмы гидроаккумулятора 18. Создавалось давление внутри диафрагмы  $P_1 = 3$  атм. Кран заполнения диафрагмы воздухом 18 закрывался.

3. Осуществлялось заполнение наружного контура теплоснабжения теплоносителем. Открывались задвижки 6, 11, 23, 28. Включалась в сеть электросхема регулирования работы электромагнитных клапанов. Электромагнитный клапан 30 переключал положение, и наружная система заполнялась водой. За счет открытия спускного вентиля 29 из наружной системы удалялся воздух. Спускной вентиль 29 поджимался. Шток мембранного насоса начинал перемещаться, в системе происходила циркуляция теплоносителя. Источник тепловой энергии в виде электрического котла включался в сеть. После стабилизации режима (около 5 мин) записывались показания с водяных счетчиков. По периодам времени перемещения штока определялась частота работы мембранного насоса.

4. Записывались результаты измерения с датчиков давления и температуры.

**Результаты исследования.** В результате тепловых испытаний построена зависимость перепада температур во внешнем контуре от частоты работы мембранного насоса (рис. 2).

Перепад температур во внешнем контуре происходит от частоты работы мембранного насоса при 50 °С и имеет тенденцию к снижению при повышении частоты. При температуре 60 °С наблюдается снижение разности температур при частоте работы мембранного насоса от 0,16 до 0,33 Гц, а после при частоте от 0,33 до 0,42 Гц график находится в состоянии покоя.



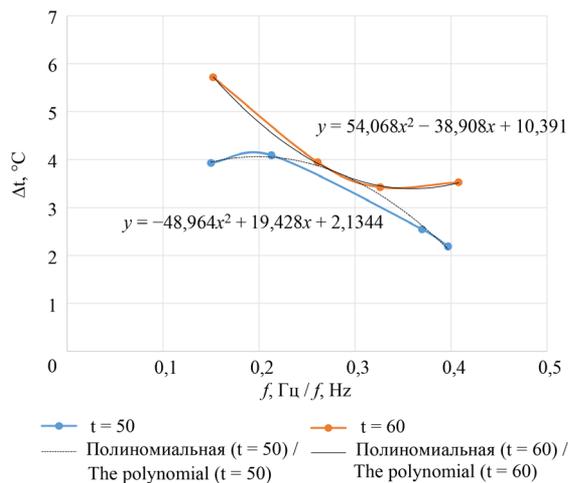
Р и с. 2. График зависимости перепада температур внешнего контура теплоснабжения от частоты хода диафрагмы мембранного насоса

F i g. 2. Diagram for the dependence of the temperature difference of the external heat supply circuit on the pump diaphragm stroking rate.

*Источник:* здесь и далее графики построены на основании полученных результатов в ходе проведения исследований.

*Source:* hereinafter in this article the diagrams are compiled by the authors of the article based on the results obtained during the study.

Далее рассмотрен перепад температур во внутреннем контуре от частоты хода диафрагмы мембранного насоса (рис. 3).

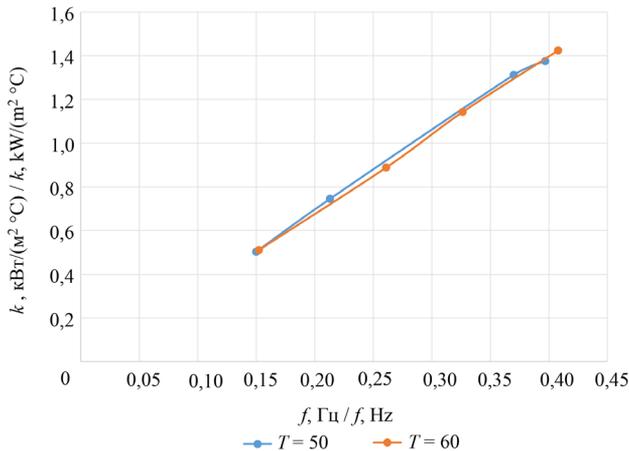


Р и с. 3. График зависимости перепада температур внутреннего контура теплоснабжения от частоты хода диафрагмы мембранного насоса

F i g. 3. Diagram of the dependence of the temperature difference of the internal heat supply circuit on the pump diaphragm stroking rate

На данном графике можно наблюдать, что при температуре 50 °С повышение параметра разности температур зависит от повышения частоты работы мембранного насоса от 0,150 до 0,215 Гц, а после 0,215 Гц значение стремится к убыли. При температуре 60 °С заметна убыль значения перепада температур от частоты работы мембранного насоса от 0,150 до 0,330 Гц, затем параметр находится в устойчивом положении до частоты 0,410 Гц.

Рассмотрим график зависимости коэффициента теплопередачи от значения частоты работы мембранного насоса (рис. 4).



Р и с. 4. График зависимости коэффициента теплопередачи теплообменника независимого подключения от частоты хода диафрагмы мембранного насоса

F i g. 4. Diagram for the dependence of the heat transfer coefficient of the heat exchanger using independent connection on the pump diaphragm stroking rate

Из данного графика следует, что стабильный рост коэффициента теплопередачи осуществляется при повышении частоты работы мембранного насоса. При этом температура подаваемого теплоносителя практически не оказывает влияния на изменение коэффициента теплопередачи.

**Обсуждение и заключение.** На экспериментальной установке однотрубной системы отопления с независимым подключением отопительных приборов с помощью мембранного насоса исследованы условия создания реверсивного движения теплоносителя. Установлено, что реверсивная передача тепловой энергии по одной трубе в системе отопления при независимой схеме с помощью мембранного насоса, использующего напор тепловой сети, возможна в широком диапазоне частот (от 0,15 до 0,40 Гц). Получены экспериментальные зависимости перепада температур в контурах от частоты пульсаций теплоносителя, показывающие, что с ростом частоты перепад температур как для внешнего, так и для наружного контура снижается более интенсивнее для меньших температур теплоносителя на входе, а коэффициент теплопередачи растет по линейной зависимости из-за увеличения расхода теплоносителя мембранного насоса. Таким образом, оптимальный диапазон частот передачи тепловой энергии по одной трубе по независимой схеме

с помощью мембранного насоса, используемого напор тепловой сети, составляет от 0,3 до 0,4 Гц. Технологические решения передачи тепловой энергии по одной трубе по независимой схеме с помощью мембранного насоса, используемого напор тепловой сети, могут успешно применяться для отопления мест общего пользования в многоквартирных домах, общежитиях (подъезды, лестничные пролеты и др.), а также низкоэтажных промышленных (сельскохозяйственных) объектах и зданиях индивидуальной жилой постройки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Попова Н.М., Таран В.Е., Петрикеева Н.А., Чудинов Д.М. Оценка технического состояния тепловых сетей в РФ. *Градостроительство. Инфраструктура. Коммуникации*. 2021;(1):16–21. EDN: **AHRZOF**  
Popova N.M., Taran V.E., Petrikeeva N.A., Chudinov D.M. [Assessment of the Technical Condition of Heating Networks in the Russian Federation]. *Gradostroitel'stvo. Infrastruktura. Kommunikacii*. 2021;(1):16–21. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **AHRZOF**
2. Новосельцев Б.П., Мершчиев А.А., Соловьев С.А. Выбор системы отопления для встроенных в жилые дома помещений общественного назначения. *Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура*. 2019;9(2):50–55. EDN: **KFUVPK**  
Novoseltsev B.P., Mershchiyev A.A., Solovyov S.A. The Choice of Heating System for Built-In Residential Building Public Rooms. *Housing and Utilities Infrastructure*. 2019;9(2):50–55. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **KFUVPK**
3. Жерлыкина М.Н., Кононова М.С. Техничко-экономическое сравнение различных материалов труб, применяемых при поквартирной разводке системы отопления. *Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура*. 2018;4(1):96–103. EDN: **YMNEOQ**  
Zherlykina M.N., Kononova M.S. Techno-Economic Comparison of Various Materials of Pipes used in the Door-to-Door Layout of the Heating System. *Housing and Utilities Infrastructure*. 2018;4(1):96–103. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **YMNEOQ**
4. Рохлецова Т.Л., Никулин С.В., Кияница Л.А. К вопросу проектирования однотрубных систем отопления в жилых зданиях. *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2016;691(7):36–45. EDN: **WYCZHT**  
Rokhletsova T.L., Nikulin S.V., Kiyantsa L.A. Designing Single-Pipe Heating System in Residential Units. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2016;691(7):36–45. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **WYCZHT**
5. Копец К.К. Техничко-экономическое сравнение однотрубных и двухтрубных систем отопления. *Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля*. 2021;54(12):75–78. EDN: **EKXDOM**  
Kopets K.K. Technical and Economic Comparison of Single-Pipe and Two-Pipe Heating Systems. *Vestnik Vladimir Dahl National University*. 2021;54(12):75–78. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **EKXDOM**
6. Новосельцев Б.П., Лобанов Д.В. Нюансы проведения капремонта системы водяного отопления в жилых зданиях старой застройки. *Сантехника. Отопление. Кондиционирование*. 2021;(3):48–50. URL: <https://clck.ru/3GfRma> (дата обращения: 26.08.2024).  
Novoseltsev B.P., Lobanov D.V. [Nuances of the Overhaul of the Water Heating System in Residential Buildings of Old Buildings]. *Santekhnika. Otoplenie. Kondicionirovanie*. 2021;(3):48–50. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://clck.ru/3GfRma> (accessed 26.08.2024).
7. Makeev A. Implementation of Pulse Heat Supply for Dependent Connection of Customers. *Magazine of Civil Engineering*. 2018;83(7):114–125. <https://doi.org/10.18720/MCE.83.11>
8. Макеев А.Н. К вопросу локальной организации импульсно-колеблющейся циркуляции теплоносителя в системе теплоснабжения. *Бюллетень науки и практики*. 2018;4(5):254–262. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1246193>

- Makeev A.N. To the Question of the Local Organization of the Pulse-Vibration Circulation of the Heat-Supplier in the Heat Supply System. *Bulletin of Science and Practice*. 2018;4(5):254–262. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.5281/zenodo.1246193>
9. Макеев А.Н. Теория организации импульсной циркуляции теплоносителя в системе теплоснабжения с независимым присоединением абонентов. *Научный журнал строительства и архитектуры*. 2018;50(2):11–20. EDN: XQGYFN  
Makeev A.N. Theory of Pulse Circulation of the Heater in the Heat Supply System with Independent Subscription of Subscribers. *Scientific Journal of Construction and Architecture*. 2018;50(2):11–20. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: XQGYFN
  10. Левцев А.П., Лысяков И.И. Система теплоснабжения с трансформацией напора тепловой сети. Патент 2825931 Российская Федерация. 2 сентября 2024. EDN: DTNWSU  
Levtsev A.P., Lysyakov I.I. Heat Supply System with Transformation of Heat Network Head. Patent 2825931 Russian Federation. 2024 September 2. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: DTNWSU
  11. Embaye M., Al-Dadah R.K., Mahmoud S. Effect of Flow Pulsation on Energy Consumption of a Radiator in a Centrally Heated Building. *International Journal of Low-Carbon Technologies*. 2016;11(1):119–129. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctu024>
  12. Embaye M., Al-Dadah R.K., Mahmoud S. Thermal Performance of Hydronic Radiator with Flow Pulsation – Numerical Investigation. *Applied Thermal Engineering*. 2015;80:109–117. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.12.056>
  13. Levsev A.P., Lapin E.S., Zhang Q. Increasing the Heat Transfer Efficiency of Sectional Radiators in Building Heating Systems. *Magazine of Civil Engineering*. 2019;92(8):63–75. <https://doi.org/10.18720/MCE.92.5>
  14. Левцев А.П., Лапин Е.С., Чжень Д. Использование тарельчатых диафрагм транспортных средств в двухконтурных мембранных насосах. *Инженерные технологии и системы*. 2023;33(1):68–78. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202301.068-078>  
Levtsev A.P., Lapin E.S., Chen D. The Use of Disk-Shaped Diaphragm of Vehicles in Double-Circuit Diaphragm Pumps. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(1):68–78. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202301.068-078>
  15. Levtsev A.P., Lapin E.S., Grishin B.M., Ezhov E.G., Rodionov Yu.V. Research of Equipment for Pulsed Heating Supply. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;828:012015. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/828/1/012015>
  16. Кочев А.Г., Саргсян С.В., Агафонова В.В. Влияние теплоотдачи отопительного прибора в одноконтурной системе водяного отопления на коэффициент затекания. *Промышленная энергетика*. 2024;(6):39–43. EDN: MTBDXJ  
Kochev A.G., Sargsyan S.V., Agafonova V.V. [The Effect of Heat Transfer of a Heating Device in a Single-Tube Water Heating System on the Leakage Coefficient]. *Industrial Energy*. 2024;(6):39–43. (In Russ.) EDN: MTBDXJ
  17. Олейников Ю.Д. Отопление: две трубы или одна? *Сантехника. Отопление. Кондиционирование*. 2011;113(5):36–37. EDN: RHVZEF  
Oleynikov Y.D. [Heating: Two Pipes or One?] *Plumbing. Heating. Air Conditioning*. 2011;113(5):36–37. (In Russ.) EDN: RHVZEF

Об авторах:

**Левцев Алексей Павлович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теплоэнергетических систем 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](mailto:levtzevap@mail.ru)

**Лапин Евгений Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры теплоэнергетических систем Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9647-8663>, [evgeniy-lapin@yandex.ru](mailto:evgeniy-lapin@yandex.ru)

**Лысяков Иван Иванович**, магистрант Института механики и энергетики Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), lvsyakov02@bk.ru

**Чжень Дайфен**, Ph.D, профессор, декан Школы энергетики Цзянсуского университета науки и технологии (212003, Китай, г. Чжэньцзян, 2 проезд Менгси), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4110-2199>, Scopus ID: 26536999100, dfchen@justc.edu.cn

*Заявленный вклад авторов:*

А. П. Левцев – формулирование идеи исследования, целей и задач; применение статистических, математических, вычислительных и других формальных методов для анализа данных исследования; осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор данных.

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

И. И. Лысяков – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор данных.

Д. Чжень – формулирование идеи исследования, целей и задач; применение статистических, математических, вычислительных и других формальных методов для анализа данных исследования.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*Поступила в редакцию 20.12.2024; поступила после рецензирования 10.01.2025;  
принята к публикации 15.01.2025*

*About the authors:*

**Alexey P. Levtshev**, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Thermal Power Systems, 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, levtshevap@mail.ru

**Evgeniy S. Lapin**, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Thermal Power Systems, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9647-8663>, evgeniy-lapin@yandex.ru

**Ivan I. Lysyakov**, Undergraduate Student of Thermal Power Systems of the Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), lvsyakov02@bk.ru

**Daifen Chen**, Ph.D., Professor, Dean of the School of Energy and Power, Jiangsu University of Science and Technology (2 Mengxi Rd, Zhenjiang 212003, China), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4110-2199>, Scopus ID: 26536999100, dfchen@justc.edu.cn

*Authors contribution:*

A. P. Levtshev – formulating the study idea, aims and objectives; applying statistical, mathematical, computational, and other formal methods to analyze the study data; conducting the study including performing experiments and collecting data.

E. S. Lapin – conducting the study specifically performing the experiments and collecting data; preparing the manuscript, specifically visualizing the study results and data obtained.

I. I. Lysyakov – conducting the study, specifically performing the experiments collecting data.

D. Chen – formulating the study idea, aims and objectives; applying statistical, mathematical, computational, and other formal methods to analyze the study data.

*All authors have read and approved the final manuscript.*

*Submitted 20.12.2024; revised 10.01.2025; accepted 15.01.2025*

**ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ /  
TECHNOLOGIERY, MACHINERY AND EQUIPMENT**<https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202501.060-083>

ISSN Print 2658-4123

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

ISSN Online 2658-6525

УДК 631.363.1

<https://vestnik.mrsu.ru>*Оригинальная статья / Original article***Влияние давления воздуха на технологический процесс измельчения зерна в дробилке****П. А. Савиных<sup>1</sup>, Н. В. Турубанов<sup>1</sup>✉,  
А. В. Алешкин<sup>2</sup>, В. А. Сухляев<sup>3</sup>**<sup>1</sup> *Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого**(г. Киров, Российская Федерация)*<sup>2</sup> *Вятский государственный университет**(г. Киров, Российская Федерация)*<sup>3</sup> *Вологодская государственная молочнохозяйственная академия имени Н. В. Верещагина**(г. Вологда, Российская Федерация)*✉ [nikolaytu@mail.ru](mailto:nikolaytu@mail.ru)**Аннотация**

*Введение.* Основной проблемой молотковых дробилок является переизмельчение зерна из-за несвоевременного отвода готового продукта из камеры измельчения. Одним из способов влияния на организацию движения воздушного потока в молотковой дробилке является изменение давления снаружи дробильной камеры, поэтому исследование влияния давления воздуха, окружающего молотковую дробилку, на качественные и энергетические показатели ее работы является актуальной задачей. *Цель исследования.* Определение влияния давления воздуха снаружи дробильной камеры на характер движения воздушного потока в дробилке зерна и ее энергетические показатели.

*Материалы и методы.* Для теоретического исследования циркуляции воздушного потока в дробильной камере построена геометрическая модель ротора, помещенного в камеру измельчения. В основе математической модели движения воздуха лежат усредненные по Рейнольдсу уравнения движения сплошной среды. По результатам расчетов построены поля скоростей воздушного потока. Для проведения экспериментальных исследований сконструирована барокамера, позволяющая менять давление воздушной среды в дробилке.

*Результаты исследования.* По результатам теоретических исследований определили, что снижение давления в камере измельчения в 10 раз позволяет снизить потребляемую мощность на 112 Вт. Во время проведения экспериментальных исследований выявили, что при снижении давления в камере измельчения уменьшается потребляемая двигателем мощность для всех типов роторов. Увеличение давления воздуха в дробильной камере приводит к изменению количества остатка на сите до 0 мм: для лопастного и молоткового роторов остаток уменьшается, а для молотково-лопастного ротора увеличивается.

© Савиных П. А., Турубанов Н. В., Алешкин А. В., Сухляев В. А., 2025

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

*Обсуждение и заключение.* Результаты теоретических и экспериментальных исследований показывают, что снижение давления воздуха снаружи дробильной камеры позволяет сократить энергетические затраты на технологический процесс и перемещение воздушного потока внутри дробильной камеры, а также уменьшить переизмельчение материала. Результаты исследований могут помочь в проектировании камеры измельчения молотковых дробилок с учетом движения воздушного потока.

**Ключевые слова:** молотковая дробилка, воздушный поток, барокамера, поле скоростей, лопастной ротор, молотковый ротор

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

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Савиных П.А., Турубанов Н.В., Алешкин А.В., Сухляев В.А. Влияние давления воздуха на технологический процесс измельчения зерна в дробилке. *Инженерные технологии и системы*. 2025;35(1):60–83. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202501.060-083>

## The Effect of Air Pressure on the Technological Process of Grinding in the Grain Hammer Mill

P. A. Savinykh<sup>a</sup>, N. V. Turubanov<sup>a</sup>✉,  
A. V. Aleshkin<sup>b</sup>, V. A. Suhlyayev<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Federal Agrarian Scientific Center of the North-East  
named after N. V. Rudnitsky  
(Kirov, Russian Federation)

<sup>b</sup> Vyatka State University  
(Kirov, Russian Federation)

<sup>c</sup> Vologda State Dairy Academy named after N. V. Vereshchagin  
(Vologda, Russian Federation)

✉ [nikolaytu@mail.ru](mailto:nikolaytu@mail.ru)

### Abstract

**Introduction.** The main problem of the grain hammer mill is over-grinding of grain caused by untimely removal of the final product from the grinding chamber. A way to effect the air flow arrangement in the grain hammer mill is to change the air pressure around the grinding chamber. Therefore, the study of the effect of air pressure around the grain hammer mill on the quality and energy indicators of its operation is an urgent task today.

**Aim of the Study.** The study is aimed at determining the effect of air pressure around the grinding chamber on the air flow motion pattern in the grain hammer mill and its energy indicators.

**Materials and Methods.** For a theoretical study of the air flow circulation in the grinding chamber, there was constructed a geometric model of the rotor placed in the grinding chamber. The Reynolds averaged equations of a continuous medium motion was the basis for the mathematical model of air motion. The calculation results were used to construct the velocity fields for the air flow. To conduct experimental studies, there was designed a pressure chamber that allows changing the air pressure in the grain hammer mill.

**Results.** Based on the results of theoretical studies, it has been determined that the pressure decrease in the grinding chamber by 10 times reduces the power consumption by 112 watts. Experimental studies have shown that when the pressure in the grinding chamber decreases, the power consumed by the engine for all types of rotors decreases too.

Also, an increase in air pressure in the grinding chamber leads to a change in the amount of grinded grain remains on the sieve to 0 mm: for the blade and hammer rotors, the amount of remains decreases, and for the hammer-blade rotor it increases.

*Discussion and Conclusions.* The results of theoretical and experimental studies have shown that decreasing the air pressure around the grinding chamber can decrease the energy costs for the technological process and air flow motion inside the grinding chamber, and reduce the over-grinding of grain. The study results make it possible to design the grinding chambers for grain hammer mills taking into account the air flow motion.

**Keywords:** grain hammer mill, air flow, pressure chamber, velocity field, blade rotor, hammer rotor

**Acknowledgements:** The author expresses his gratitude to the anonymous reviewers whose objective comments contributed to the quality of the article.

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

**For citation:** Savinykh P.A., Turubanov N.V., Aleshkin A.V., Suhlyayev V.A. The Effect of Air Pressure on the Technological Process of Grinding in the Grain Hammer Mill. *Engineering Technologies and Systems*. 2025;35(1):60–83. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202501.060-083>

**Введение.** Основная масса фуражного зерна поступает на корм животным и птице [1; 2]. Около 50 % протеина доставляется в организм животного из зерновых и зернобобовых культур. При недостатке до 19 % перевариваемого протеина снижение животноводческой продукции может составить до 30–35 %, поэтому корма необходимо подготавливать так, чтобы максимальное количество протеина могло усвоиться животными [3; 4]. С этой целью корм необходимо измельчать. Благодаря такому способу подготовки нарушается твердая структура зерновки, питательные вещества становятся доступными, повышается площадь воздействия пищеварительного сока на потребляемый корм и, как следствие, происходит более быстрое усвоение необходимых для организма животного веществ.

Для каждого вида и возраста животного существуют свои требования по степени измельчения. Согласно требованиям<sup>1</sup> выделяют три степени помола: от 1,8 до 2,6 мм – крупный помол; от 1,0 до 1,8 мм – средний; от 0,2 до 1,0 мм – мелкий. Размеры частиц концентрированных кормов для крупного рогатого скота не должны превышать 3 мм, для взрослых свиней – 1,2...1,6 мм, для птицы – до 1 мм (при использовании влажного корма) и 2...3 мм (при сухом корме).

В качестве измельчителей используют дробилки с различными рабочими органами (молотки, ножи, лопасти и др.). Наиболее широкое применение на сегодняшний день нашли дробилки с молотковыми рабочими органами<sup>2</sup>. Однако дробилки такого типа имеют явный недостаток – переизмельчение материала из-за несвоевременного отвода готового продукта из камеры измельчения<sup>3</sup> [5]. Наиболее характерно переизмельчение для молотковых дробилок, где в качестве

<sup>1</sup> НТП-АПК 1.10.16.002-03. Нормы технологического проектирования сельскохозяйственных предприятий по производству комбикормов [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200034655> (дата обращения: 25.09.2024).

<sup>2</sup> Огородов Д. А., Панаев Д. С. Повышение эффективности молотковой дробилки зерна // Научные труды студентов Ижевской ГСХА. 2022. Т. 2. С. 745–748. EDN: GZOTFE

<sup>3</sup> Анисимов М. С., Стрелков Е. С. Изменение содержания пылевидной фракции в готовом продукте в зависимости от кратности воздействия дробилки на зерно // Научные труды студентов Ижевской ГСХА. 2023. Т. 1. С. 1216–1220. EDN: XRYKNL

деки используется решето [6; 7]. Для устранения этой проблемы необходимо создание дополнительного воздушного потока, способствующего выводу материала из дробильной камеры.

Для более эффективного отвода готового продукта нами предложена конструкция ротора с лопастями, которые разрушают материал и создают дополнительный воздушный поток. Создаваемый лопастями воздушный поток циркулирует внутри камеры измельчения, на его движение затрачивается дополнительная энергия. С увеличением скорости вращения ротора повышается и количество перемещаемого воздуха [8]. Экспериментальные исследования движения воздушного потока в дробильной камере затруднительны ввиду вращающегося с большой частотой ротора и разнонаправленности векторов скоростей движения воздуха в различных точках камеры измельчения. Теоретические исследования движения воздушно-продуктового потока внутри дробильной камеры немногочисленны, поэтому изучение движения таких потоков является актуальным. Теоретические исследования позволяют оценить величину влияния конструктивно-технологических факторов на характер движения воздушного потока. Для снижения затрат энергии на перемещение создаваемого воздушного потока лопатками ротора нами проведены теоретические и экспериментальные исследования.

Цель исследований – определение влияния давления воздуха снаружи дробильной камеры на характер движения воздушного потока в камере измельчения, а также вычисление энергетических затрат на процесс измельчения.

**Обзор литературы.** Изучению движения воздушного потока в дробильной камере посвящены исследования многих авторов, но процесс недостаточно изучен, поэтому требует дополнительного внимания. Уменьшение переизмельчения материала в молотковых дробилках возможно за счет установки дополнительных лопаток к молотковому ротору и использования лопастного ротора. В камере измельчения дробилки с лопастным рабочим органом создается дополнительный воздушный поток, способствующий отводу готового продукта, но также создающий дополнительные затраты энергии на его движение. Б. Г. Зиганшин, С. Ю. Булатов, К. Е. Миронов, В. Н. Рукавишникова, Н. П. Шкилев проводили исследования влияния конструкции ротора молотковой дробилки на движение воздушного потока в камере измельчения. Исследования показали, что использование комбинированного ротора позволяет увеличить площадь сепарации материала через решета за счет изменения направления движения воздушного потока. Применение в конструкции ротора только прямоугольных или угловых молотков не позволяет полностью использовать площадь сепарации [9]. Исследования В. В. Садова, С. А. Сорокина позволили определить зависимость эффективности измельчения в молотковой дробилке с вертикальным валом от плотности воздушно-продуктового слоя. Устанавливаемые на ротор разгонные лопатки позволяют создать дополнительное статическое давление по периферии ротора, повысить плотность воздушно-продуктового слоя и эффективность процесса измельчения за счет увеличения числа соударений частиц материала с молотками. Также воздушный поток, дополнительно создаваемый лопатками, способствует выведению из камеры измельчения готового продукта [10].

В работах авторов<sup>4</sup> [11; 12] представлены исследования движения частицы в воздушном потоке, по результатам которых получены математические зависимости и построены траектории движения. Исследования позволяют описать траекторию движения частицы в горизонтальном воздушном потоке, что позволяет полученные результаты использовать при проектировании машин с пневматической сепарацией. Авторы<sup>5</sup> в своей работе при расчете траектории движения частицы также учитывают турбулентность воздушного потока. Для описания движения частиц по криволинейной поверхности под действием воздушного потока учеными<sup>6</sup> [13] разработана математическая модель, позволяющая построить траекторию движения частицы. Изучение движения частицы по криволинейной поверхности позволяет исследовать влияние конструктивных особенностей камеры измельчения на траекторию ее движения.

Результаты теоретических исследований также можно использовать для проектирования конструктивных элементов пневмосепарирующих каналов. Исследователи [14] на основании проведенных теоретических расчетов определили ширину камеры сепарации материала для выбранной культуры. Ученые В. А. Лазыкин, А. И. Бурков, А. Л. Глушков, В. Ю. Мокиев теоретическими исследованиями движения воздушного потока в пневмосепарирующем канале показали, что установка направляющих лопаток в канал позволяет выровнять скорость движения воздушного потока<sup>7</sup>.

Для повышения эффективности измельчения материалов в молотковых дробилках ученые вносят изменения в конструкцию камеры измельчения. Дополнительная установка вихревых камер изменяет направление движения воздушно-продуктового потока и способствует снижению энергозатрат при дроблении. В работах [15; 16] представлены исследования по влиянию установки вихревых камер в дробилках на движение воздушного потока. Установка вихревых камер позволяет снизить скорость воздушно-продуктового потока и изменить его направление, способствуя тем самым увеличению скорости соударения молотков и частиц материала.

Установка в камеру измельчения различных конструктивных элементов создает дополнительное сопротивление движению материала и способствует более

---

<sup>4</sup> Сайтов В. Е., Суворов А. Н., Фарафонов В. Г. Математическая модель движения частицы в прямолинейном пневмосепарирующем канале с учетом неравномерности структуры воздушного потока // Улучшение эксплуатационных показателей сельскохозяйственной энергетики : материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. «Наука-Технология-Ресурсосбережение» (6 февраля 2013 г., г. Киров). Киров. 2013. С. 148–153. EDN: XSLWBT

<sup>5</sup> Ефименко В. В. Движение частицы в горизонтальном канале с турбулентным воздушным потоком // Совершенствование механизированных процессов производства и переработки сельскохозяйственной продукции в условиях Приморского края : сб. науч. тр. Уссурийск : Приморская государственная сельскохозяйственная академия, 2009. С. 124–132. EDN: SZHJMX

<sup>6</sup> Карпова М. В., Лебедев И. Ф., Никифорова Л. В., Яковлев Б. В. Разработка математической модели движения частиц по искривленной поверхности пневмосепаратора под действием воздушного потока // Геомеханические и геотехнологические проблемы эффективного освоения месторождений твердых полезных ископаемых северных и северо-восточных регионов России : тр. Третьей Всерос. науч.-практ. конф., посвященной памяти чл.-кор. РАН М. Д. Новопашина (16 – 19 июня 2015 г., г. Якутск). Якутск, 2015. С. 77–82. EDN: VUMLHX

<sup>7</sup> Лазыкин В. А., Бурков А. И., Глушков А. Л., Мокиев В. Ю. Теоретическое исследование влияния направляющих лопаток в отводе пневмосепарирующего канала на равномерность воздушного потока // Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства : материалы Междунар. науч.-практ. конф. «Мосоловские чтения» (16 – 17 марта 2022 г., г. Йошкар-Ола). Йошкар-Ола, 2022. С. 605–608. EDN: TJMLNL

эффективному его разрушению. В работе А. И. Матвеева и В. Р. Винокурова в результате проведенных экспериментальных исследований доказано, что дополнительная установка отбойных элементов позволяет повысить степень измельчения, а эффективность работы ступенчатой центробежной мельницы увеличивается за счет влияния воздушного потока на технологический процесс [17].

Большое влияние на процесс измельчения оказывает равномерность распределения измельчаемого материала по сепарирующей поверхности. Ученые<sup>8</sup> исследовали распределение воздушно-продуктового потока в камере измельчения дробилки. Экспериментальные исследования показали, что по мере движения материала вдоль оси дробильной камеры происходит измельчение. Крупные частицы материала подвергаются воздействию верхних молотков, по мере продвижения материала к нижним молоткам величина частиц уменьшается. Своевременный отвод готового продукта из дробилки с вертикальным ротором способствует снижению энергозатрат на измельчение и повышению производительности. В работе [18] предложен метод теоретического исследования циклической коррекции траектории движения стандартных частиц измельченного сырья в оптимальной зоне расположения разделительных сит. Представлена возможность обоснования допустимых пределов входных параметров технического решения с учетом изменчивости условий эксплуатации и моделируемой функции. Функциональные зависимости позволяют получить поле скоростей отраженных обусловленных частиц во времени и величину траектории их движения в поперечном воздушно-продуктовом потоке.

Анализ литературных источников по рассматриваемой теме показывает, что на сегодняшний день отсутствует сложившаяся теория описания технологического процесса измельчения материала в дробильной камере. Основная причина заключается в том, что на характер движения частиц материала оказывает влияние большое количество факторов. Очень сложно описать математическими зависимостями взаимосвязь этих факторов, поэтому для получения адекватных математических моделей, описывающих движение частиц воздушно-продуктового потока при теоретических исследованиях, необходимо принимать большое количество допущений. Проведение теоретических исследований с использованием в расчете максимального количества влияющих на технологический процесс факторов является основным направлением при задании граничных условий для решения поставленной задачи.

**Материалы и методы.** С целью теоретического исследования циркуляции воздушного потока в дробильной камере построена геометрическая модель ротора, помещенного в камеру измельчения, с восьмью лопастями.

В основе математической модели движения воздуха лежат усредненные по Рейнольдсу уравнения движения сплошной среды<sup>9</sup>:

<sup>8</sup> Клевцова Т. А., Пупынин А. А. Исследование распределения зерна по камере дробления дробилки с вертикальным ротором // Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК : материалы XV Междунар. науч.-практ. конф. (8 июня 2023 г., г. Москва). Москва, 2023. С. 140–147. EDN: SLVUAH

<sup>9</sup> Авраменко М. И. О  $k$ - модели турбулентности. 2-е изд., перераб. и доп. Снежинск : Изд-во РФЯЦ – ВНИИТФ, 2010. 102 с.

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + u_i \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = \rho f_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( -p + \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j} \right),$$

где  $u_i$  – усредненная скорость в направлении координаты  $x_j$ , м/с;  $i, j = 1, \dots, 3$ ;  $u'_i, u'_j$  – пульсационные составляющие скорости по соответствующим координатам, м/с;  $\rho$  – плотность сплошной среды, кг/м<sup>3</sup>;  $f_i$  – удельные массовые силы, которые во вращающихся доменах включают силы инерции, Н;  $\mu$  – динамическая вязкость среды, Па·с;  $p$  – усредненное давление, Па;  $\overline{\quad}$  – символ усреднения.

Причем

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij},$$

где  $\mu_t$  – динамическая турбулентная вязкость, Па·с;  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера;  $k$  – кинетическая энергия турбулентности, Дж/кг:

$$k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i}.$$

Для замыкания системы уравнений используется уравнение неразрывности сплошной среды:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0,$$

где  $\nabla$  – оператор Гамильтона, а также два дифференциальных уравнения, описывающие турбулентные вязкие напряжения по стандартной модели турбулентности  $k - \varepsilon$ :

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \cdot \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - \rho \varepsilon,$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k},$$

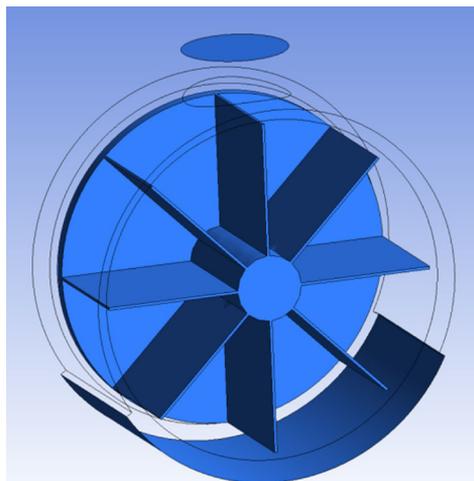
где  $\varepsilon$  – скорость диссипации кинетической энергии турбулентности;  $E_{ij}$  – компонент скорости деформации.

Динамическая турбулентная вязкость:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}.$$

Регулируемые постоянные в модели имеют подобранные по расчетной практике универсальные значения:  $C_\mu = 0,09$ ;  $\sigma_k = 1$ ;  $\sigma_\varepsilon = 1,3$ ;  $C_{1\varepsilon} = 1,44$ ;  $C_{2\varepsilon} = 1,92$ .

Для исследования движения воздушного потока в дробилке с лопастным ротором использовался расчетный пакет Ansys CFX с оболочкой Workbench (рис. 1).



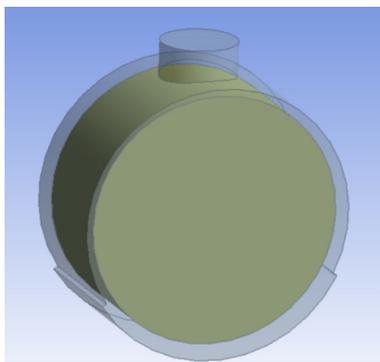
Р и с. 1. Модель ротора с лопастями в камере измельчения

F i g. 1. Rotor with blades in the grinding chamber

*Источник:* модели для рисунков 1–3, 5–14 построены авторами статьи в программе Ansys.

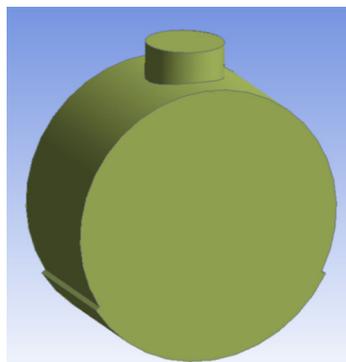
*Source:* the models for the figures 1–3, 5–14 are built by the authors of the article in the program Ansys.

В качестве тел течения выбраны два домена: вращающийся цилиндр (рис. 2) с вырезанными из него элементами ротора и стационарный домен, охватывающий со всех сторон первый и примыкающий к нему по гладким поверхностям вращения (рис. 3).



Р и с. 2. Модель вращающегося домена

F i g. 2. Rotating domain

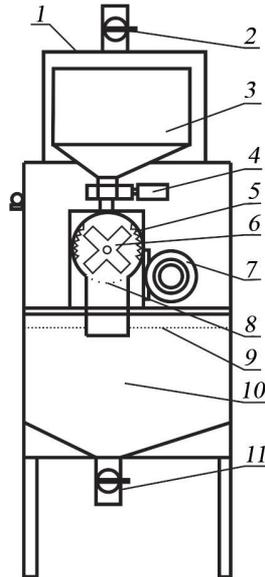


Р и с. 3. Модель неподвижного домена

F i g. 3. Fixed domain

Для проверки результатов теоретических исследований проведены экспериментальные исследования. При проведении экспериментальных исследований для определения влияния изменения давления воздуха в дробилке на энергетические и технологические показатели измельчения зернового материала сконструирована барокамера, схема которой представлена на рисунке 4 [19].

*Technologery, machinery and equipment*



Р и с. 4. Схема барокамеры:

1 – камера; 2 – загрузочный шлюз; 3 – загрузочный бункер; 4 – дозатор; 5 – дека; 6 – ротор;  
7 – двигатель; 8 – решето; 9 – воздухопроницаемая мембрана; 10 – приемный бункер;  
11 – выгрузной шлюз

Fig. 4. Pressure chamber diagram:

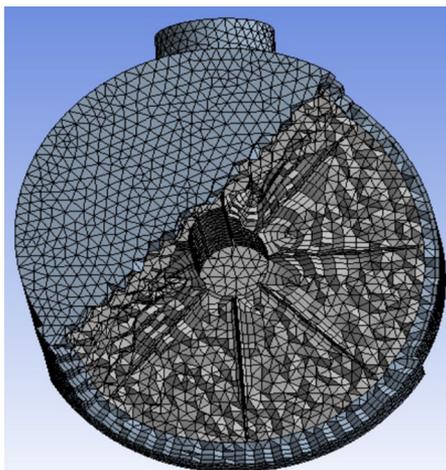
1 – chamber; 2 – loading gateway; 3 – loading hopper; 4 – dispenser; 5 – deck; 6 – rotor; 7 – motor;  
8 – solution; 9 – breathable membrane; 10 – receiving hopper; 11 – unloading gateway

*Источник:* схема построена авторами статьи.

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

Измельчаемый материал через загрузочный шлюз 2 поступает в загрузочный бункер 3. После наполнения загрузочного бункера 3 загрузочный шлюз 2 закрывается, и в камере 1 создается требуемое давление. Включается двигатель 7, который приводит во вращение ротор 6 дробилки. Из загрузочного бункера 3 дозатором 4 измельчаемый материал подается в дробилку. Ротор 6 ударяет по частицам материала. Не разрушившиеся частицы оказываются в деке 5 и подаются на повторное измельчение. Готовый продукт через решето 8 поступает в приемный бункер 10. Воздухопроницаемая мембрана 9 препятствует созданию вихревых потоков и способствует выравниванию давления в камере 1. После измельчения всего материала двигатель 7 отключается, в камере 1 создается атмосферное давление, открывается выгрузной шлюз 11, материал из бункера 10 подается на выгрузку. Разрежение, создаваемое в камере 1, позволяет уменьшить плотность циркулирующего воздушного потока, снижая затраты энергии на процесс измельчения.

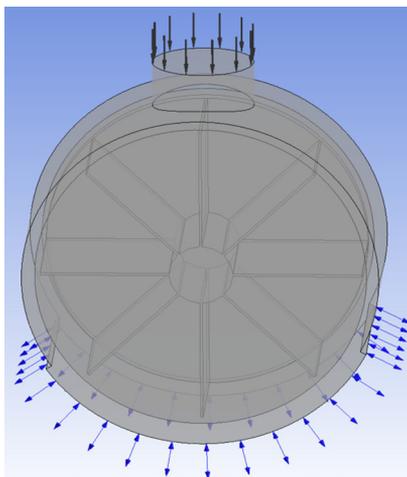
**Результаты исследования.** Для проведения расчетов разбили модель доменов на элементы сеточным генератором. Получили сетку, состоящую из 138 885 элементов и 254 326 узлов, с программным контролем ее качества и добавлением пограничных слоев (рис. 5).



Р и с. 5. Модель доменов в разрезе с элементами сетки  
F i g. 5. Domains in the section with grid elements

Для проведения расчета задавали угловую скорость ротора  $\omega = 50 \text{ с}^{-1}$ .

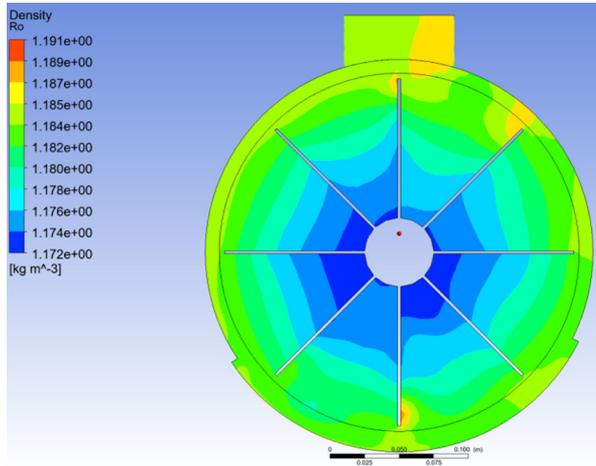
Граничные условия показаны на рисунке 6: скорость на входе в камеру варьировалась от 1 до 10 м/с; на выходе из камеры использовалось условие – открытое окно с нулевым относительным давлением, равным давлению снаружи дробильной камеры; на стенках ротора и корпуса камеры измельчения использовалось условие прилипания потока.



Р и с. 6. Граничные условия  
F i g. 6. Boundary conditions

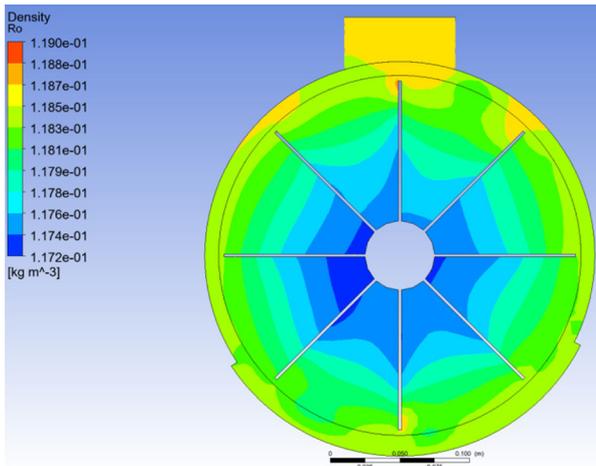
Расчеты проведены при разных давлениях с шагом 0,01 МПа от нуля до нормального атмосферного давления. В результате получены распределения: плотность воздуха; абсолютные давления; поле скоростей воздуха в каждом домене.

Отметим одинаковый характер роста плотности воздуха к периферии ротора в вертикальном сечении камеры измельчения (рис. 7, 8) для всех давлений снаружи дробильной камеры при отличающихся на порядок абсолютных значениях.



Р и с. 7. Распределение плотности воздуха в камере измельчения при атмосферном давлении 101 325 Па. Скорость потока на входе 5 м/с

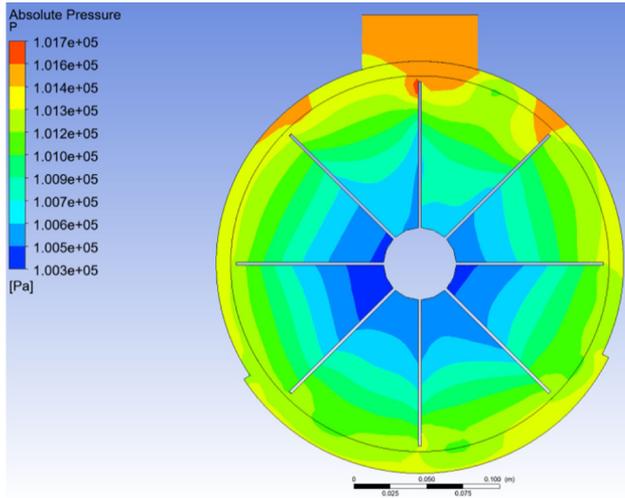
F i g. 7. Distribution of air density in the grinding chamber at an atmospheric pressure of 101 325 Pa. The flow rate at the inlet is 5 m/s



Р и с. 8. Распределение плотности воздуха в камере измельчения при атмосферном давлении 10 132,5 Па. Скорость потока на входе 5 м/с

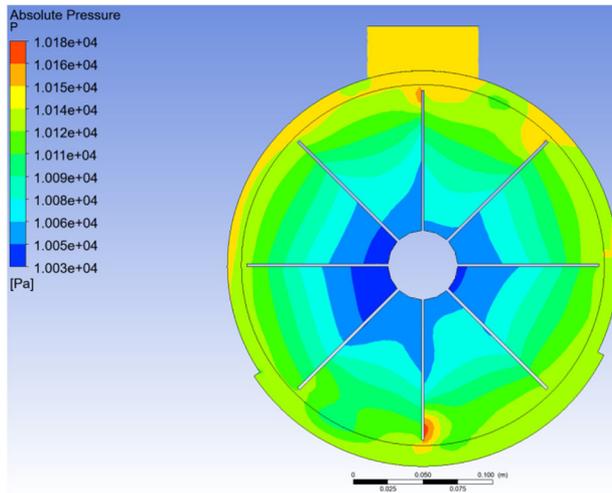
F i g. 8. Distribution of air density in the grinding chamber at an atmospheric pressure of 10 132.5 Pa. The flow rate at the inlet is 5 m/s

На рисунках 9, 10 показано распределение абсолютных давлений для тех же значений давления снаружи дробильной камеры. Следует отметить подобный характер распределений плотностей и давлений с возрастанием от оси ротора.



Р и с. 9. Распределение абсолютных давлений в камере измельчения при атмосферном давлении 101 325 Па. Скорость потока на входе 5 м/с

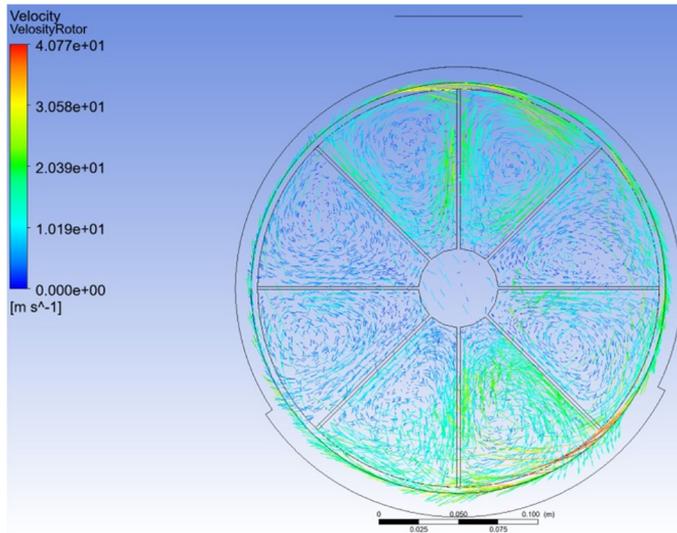
F i g. 9. Distribution of absolute pressures in the grinding chamber at an atmospheric pressure of 101 325 Pa. The flow rate at the inlet is 5 m/s



Р и с. 10. Распределение абсолютных давлений в камере измельчения при атмосферном давлении 10 132,5 Па. Скорость потока на входе 5 м/с

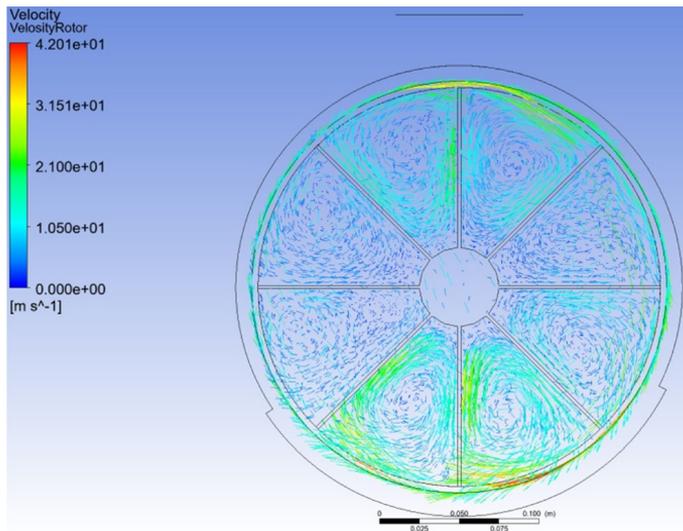
F i g. 10. Distribution of absolute pressures in the grinding chamber at an atmospheric pressure of 10 132.5 Pa. The flow rate at the inlet is 5 m/s

Движение воздуха внутри лопастного ротора при двух величинах давления снаружи дробильной камеры показано на рисунках 11, 12. Отметим вращение потока между лопастями в сторону противоположную вращению ротора в относительном движении. На рисунке 13 представлено поле скоростей воздуха в абсолютном движении.



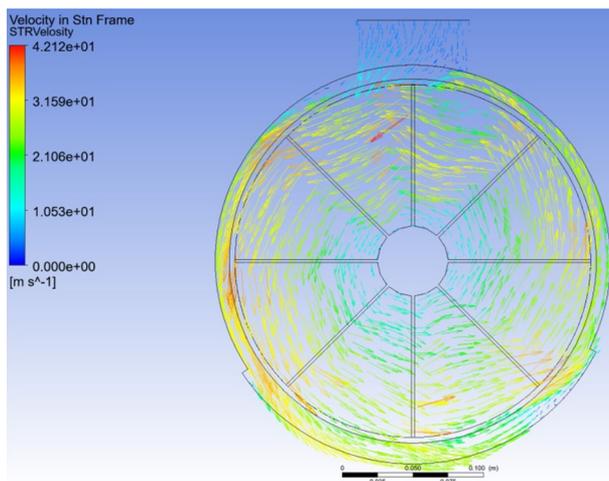
Р и с. 11. Распределение поля относительных скоростей воздуха внутри лопастного ротора при атмосферном давлении 101 325 Па. Скорость потока на входе 5 м/с

F i g. 11. Distribution of the field of relative air velocities inside the blade rotor at an atmospheric pressure of 101 325 Pa. The flow rate at the inlet is 5 m/s



Р и с. 12. Распределение поля относительных скоростей воздуха внутри лопастного ротора при сниженном давлении  $p = 10\ 132,5$  Па. Скорость потока на входе в камеру 5 м/с

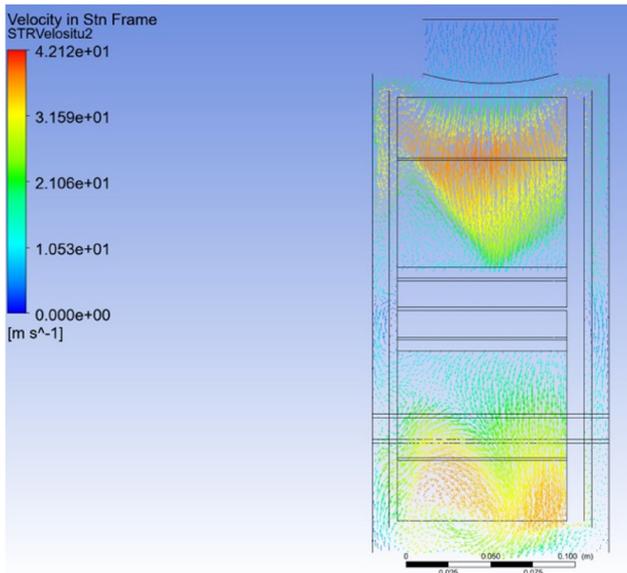
F i g. 12. Distribution of the field of relative air velocities inside the blade rotor at a reduced pressure  $p = 10\ 132.5$  Pa. The flow rate at the entrance to the chamber is 5 m/s



Р и с. 13. Распределение поля абсолютных скоростей воздуха внутри лопастного ротора при атмосферном давлении 101 325 Па. Скорость потока на входе 5 м/с

F i g. 13. Distribution of the field of absolute air velocities inside the blade rotor at an atmospheric pressure of 101 325 Pa. The flow rate at the inlet is 5 m/s

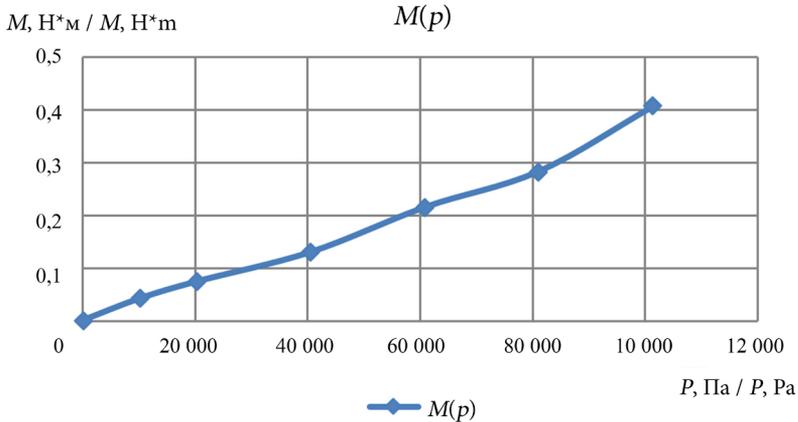
На рисунке 14 показано движение потока воздуха в поперечном сечении, близком к осевому, из которого видно, что характер движения не является плоскопараллельным и сопровождается смещением слоев вдоль оси ротора.



Р и с. 14. Распределение поля абсолютных скоростей воздуха внутри лопастного ротора при атмосферном давлении 101 325 Па в поперечном сечении. Скорость потока на входе 5 м/с

F i g. 14. Distribution of the field of absolute air velocities inside the blade rotor at an atmospheric pressure of 101 325 Pa in cross section. The flow rate at the inlet is 5 m/s

Проведены расчеты момента  $M$ , создаваемого воздушным потоком на поверхности ротора для разных давлений (рис. 15). Момент на валу ротора определялся по результатам расчетов в Ansys как момент воздействия сплошной среды и дискретных частиц на вращающийся ротор при различных давлениях снаружи дробильной камеры. Мощность  $N$  на привод ротора, затрачиваемая на перемещение воздуха, пропорциональна этому моменту  $N = M \omega$  (рис. 16).



Р и с. 15. Момент на оси ротора  
F i g. 15. Torque on the rotor axis

Источник: графики для рисунков 15–17, 21, 22 построены авторами статьи.

Source: the graphs for the Figure 15–17, 21, 22 are plotted by the authors of the article.

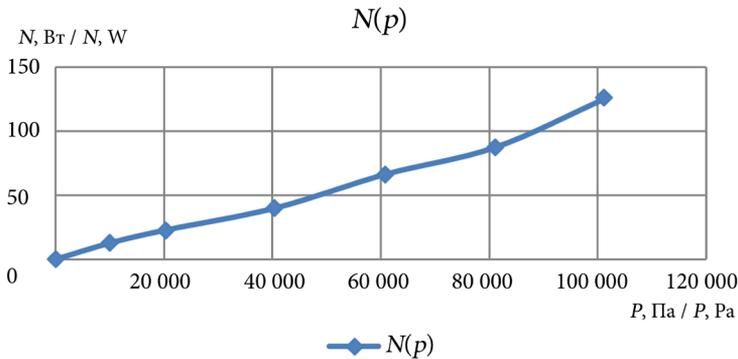


Рис. 16. Мощность на оси ротора, затрачиваемая на перемещение воздуха  
Fig. 16. The power on the rotor axis spent on air movement

Анализ результатов показывает, что на перемещение воздуха в дробилке при атмосферном давлении затрачивается мощность  $N = 125$  Вт, а при давлении снаружи дробильной камеры  $p = 10\,132,5$  Па (0,1 ат)  $N = 13$  Вт. Снижение мощности прямо пропорционально уменьшению давления снаружи дробильной камеры. Мощность составляет 112 Вт. Несмотря на ее небольшие абсолютные

значения при увеличении масштаба устройства, возможно получить значительный положительный эффект от снижения давления в дробилке.

На рисунке 17 представлены зависимости момента  $M$  (сил давления воздушного потока на поверхности ротора) от скорости потока на входе в камеру при двух величинах давления снаружи дробильной камеры.

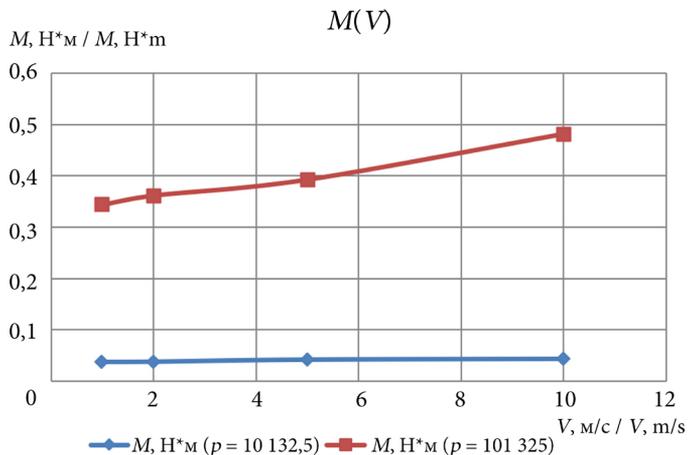


Рис. 17. Момент на оси ротора на перемещение воздуха в зависимости от скорости потока воздуха на входе в дробилку

Fig. 17. The moment on the rotor axis for the movement of air, depending on the flow rate at the entrance to the crusher

Анализ этих зависимостей показывает, что повышение скорости воздуха, протекающего через камеру измельчения, увеличивает момент на роторе, причем это увеличение более выражено при бóльшем давлении снаружи дробильной камеры.

Для установления влияния давления воздуха в камере измельчения на технологический процесс проведены экспериментальные исследования. Они проводились внутри барокамеры (рис. 18) с дробилками двух типов – с осевой и радиальной подачей материала (рис. 19)<sup>10</sup> [19].

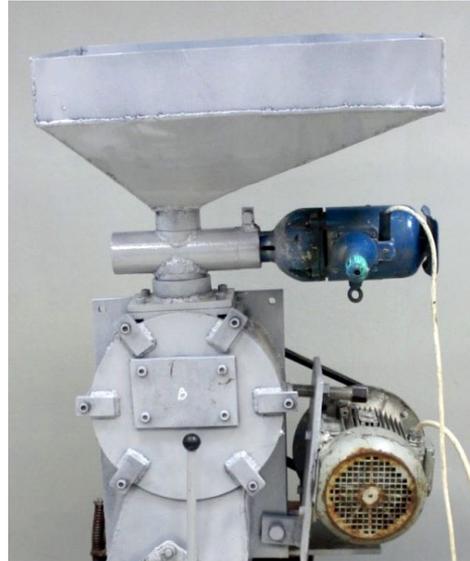
Для загрузки измельчаемого материала и выгрузки готового продукта использовали верхний 2 и нижний 11 шлюзовые затворы (рис. 4). Силовые провода и провода телеметрии введены в барокамеру через герметичные разъемы. Давление в барокамере изменяли через шаровые краны. Избыточное давление создавали поршневым компрессором и поддерживали на заданном уровне пневматическим регулятором расхода. Вакуум создавали шибберным вакуумным насосом и поддерживали на заданном уровне вакуумным регулятором.

<sup>10</sup> Белозеров С. А., Сухляев В. А. Влияние конструктивно-технологических параметров молотковой дробилки на показатели ее рабочего процесса // Инновационные тенденции развития российской науки : материалы XVI Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых (29 – 31 марта 2023 г., г. Красноярск). Красноярск, 2023. С. 256–258. EDN: OYBGXG



Р и с. 18. Общий вид экспериментальной барокамеры

F i g. 18. General view of the experimental pressure chamber



Р и с. 19. Общий вид дробилки при радиальной подаче зернового материала в дробильную камеру

F i g. 19. General view of the crusher with radial feed of grain material into the crushing chamber

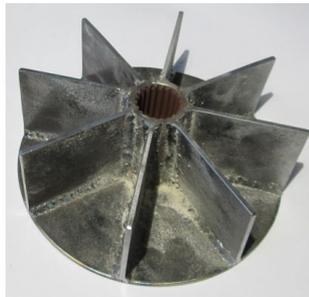
*Источник:* фотографии для рисунков 18–20 сделаны Н. В. Турубановым при проведении экспериментальных исследований в производственном помещении в 2024 г.

*Source:* the photo for the figures 18–20 were taken by N. V. Turbanov while conducting experimental studies in the production facility in the winter of 2024.

Экспериментальные исследования проводили с тремя типами роторов: молотково-лопастным (рис. 20а), лопастным (рис. 20б) и молотковым (рис. 20с). Диаметры всех используемых роторов по концам молотков и лопастей одинаковы [20].



а)



б)

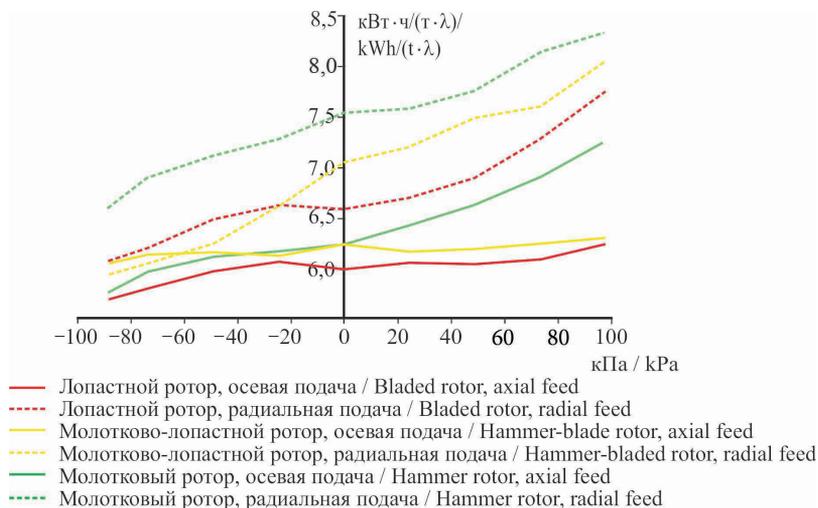


в)

Р и с. 20. Общий вид роторов:  
а) молотково-лопастной ротор; б) лопастной ротор; в) молотковый ротор

F i g. 20. General view of rotors:  
а) hammer-blade rotor; б) blade rotor; в) hammer rotor

На рисунке 21 приведена зависимость удельных энергозатрат от способа загрузки дробилки, конструкции ротора и давления в барокамере. Давление в барокамере изменяли от  $-88,26$  до  $+98,07$  кПа относительно нормального атмосферного давления, принятого за нулевую точку.



Р и с. 21. Удельные энергозатраты на измельчение кВт·ч/(т·λ) при вариации параметров давления/разрежения в дробильной камере

F i g. 21. Specific energy consumption for crushing kWh/(t·λ) with variations in pressure/discharge parameters in the crushing chamber

Увеличение давления в дробильной камере при измельчении зерна приводит к повышению удельных энергозатрат при осевой подаче зернового материала в интервалах варьирования от  $5,69$ – $6,07$  до  $6,24$ – $7,23$  кВт·ч/(т·λ), а при радиальной подаче от  $5,91$ – $6,59$  до  $7,74$ – $8,31$  кВт·ч/(т·λ) при использовании различных конструкций роторов (где  $\lambda$  – единица степени измельчения). Наиболее стабильные характеристики по удельным энергозатратам при изменении параметров рабочей атмосферы наблюдали во время осевой подачи зернового материала в дробилку.

Результаты экспериментальных исследований показывают, что снижение значения давления воздуха в дробильной камере от атмосферного до величины  $-88,26$  кПа позволяет повысить эффективность измельчения на 25 % без учета затрат на создание разрежения.

Проанализировав значения удельных энергозатрат, полученных по результатам исследований, для давления воздуха в камере измельчения  $-88,26$  кПа по сравнению с атмосферным давлением, принятым за нулевое значение, пришли к следующим выводам:

- для лопастного ротора при осевой подаче удельные энергозатраты снизились на 5,06 %, при радиальной – на 7,40 %;
- для молотково-лопастного ротора при осевой подаче удельные энергозатраты снизились на 2,71 %, при радиальной – на 15,54 %;

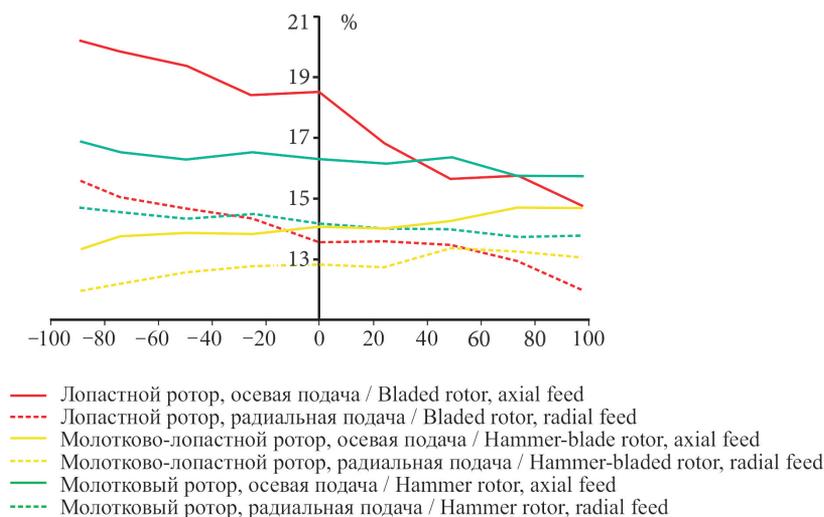
– для молоткового ротора при осевой подаче удельные энергозатраты снизились на 7,91 %, при радиальной – на 12,38 %.

Сравнив удельные энергозатраты для давления воздуха в камере измельчения 98,07 кПа по отношению к атмосферному, принятому за нулевое значение, получили следующие результаты:

– для лопастного ротора при осевой подаче удельные энергозатраты увеличились на 3,99 %, при радиальной – на 17,61 %;

– для молотково-лопастного ротора при осевой подаче удельные энергозатраты увеличились на 1,03 %, при радиальной – на 14,24 %;

– для молоткового ротора при осевой подаче удельные энергозатраты увеличились на 15,65 %, при радиальной – на 10,55 %.



Р и с. 22. Процентное содержание (по массе) остатка на сите 0 мм при изменении параметров давления/разрежения в барокамере

F i g. 22. Percentage (by weight) of remains on the sieve is 0 mm when changing the pressure/discharge parameters in the pressure chamber

Анализ процентного содержания пылевидной фракции (рис. 22) показал, что изменение параметров давления/разрежения в дробильной камере от  $-88,26$  кПа до  $+98,07$  кПа относительно нормального атмосферного давления приводит к изменению количества остатка дерти на сите 0 мм. Например, с увеличением давления в барокамере остаток дерти на сите 0 мм для лопастного и молоткового роторов уменьшается в интервалах варьирования от 15,56–20,17 до 11,98–14,77 % и от 14,75–16,89 до 13,80–15,75 % соответственно, а для молотково-лопастного ротора увеличивается в интервалах варьирования от 11,95–13,32 до 13,03–14,66 %.

Изменение давления в барокамере практически не оказывает влияния на степень измельчения вне зависимости от конструкции роторов и способов подачи. Помол дерти можно охарактеризовать как мелкий при использовании различных конструкций роторов и способа подачи зернового материала.

Теоретические исследования привели к следующим результатам: 1) падение давления в камере измельчения в 10 раз позволяет снизить потребляемую двигателем лопастного ротора мощность при измельчении на 112 Вт; 2) наблюдается одинаковый характер роста плотности воздуха и давления к периферии ротора в вертикальном сечении камеры измельчения для всех значений давления снаружи дробильной камеры; 3) распределение поля относительных скоростей воздуха внутри лопастного ротора и абсолютных скоростей в обоих расчетных доменах определяется вращением потока вместе с ротором и почти не зависит от скорости на входе в камеру измельчения; в относительном движении наблюдается вращение потока между лопастями в противоположную вращению ротора сторону; 4) повышение скорости воздуха, протекающего через камеру измельчения, увеличивает момент на роторе, причем это увеличение более выражено при большем давлении снаружи дробильной камеры (на 29 % при изменении скорости с 1 до 10 м/с).

Экспериментальные исследования показали, что увеличение давления воздуха в дробильной камере при измельчении зерна от  $-88,26$  кПа до  $+98,07$  кПа приводит к увеличению удельных энергозатрат при осевой подаче зернового материала в интервалах варьирования от  $5,69-6,07$  до  $6,24-7,23$  кВт·ч/(т·л), а при радиальной подаче от  $5,91-6,59$  до  $7,74-8,31$  кВт·ч/(т·л) при использовании различных конструкций роторов.

Увеличение давления воздуха в дробильной камере от  $-88,26$  до  $+98,07$  кПа при измельчении зерна приводит к изменению количества остатка дерти на сите до 0 мм в следующих интервалах: для лопастного и молоткового роторов остаток уменьшается в интервалах варьирования от  $15,56-20,17$  до  $11,98-14,77$  % и от  $14,75-16,89$  до  $13,80-15,75$  % соответственно, а для молотково-лопастного ротора увеличивается в интервалах варьирования от  $11,95-13,32$  до  $13,03-14,66$  %.

**Обсуждение и заключение.** Проведенные теоретические исследования позволяют оценить влияние величины давления окружающего дробилку воздуха на характер движения воздушного потока внутри камеры измельчения и энергетические затраты на технологический процесс. Результаты теоретических исследований подтверждаются экспериментальными и свидетельствуют о том, что снижение давления воздуха снаружи дробильной камеры позволяет минимизировать энергетические затраты на технологический процесс измельчения зернового материала и перемещение воздушного потока внутри дробильной камеры, а также уменьшает остаток на сите до 0 мм, то есть позволяет избежать переизмельчения материала. Полученные результаты исследований можно применять при проектировании камер измельчения молотковых дробилок. Также приведенные результаты позволяют оценить влияние величины атмосферного давления на качественные и энергетические показатели молотковых измельчителей при их эксплуатации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Савиных П.А., Турубанов Н.В. Влияние изменения технологических параметров смесителя комбикормов на показатели его работы. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2022;23(5):732–739. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2022.23.5.732-739>

- Savinykh P.A., Turubanov N.V. The Influence of Changes in the Technological Parameters of the Feed Mixer on its Performance. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2022;23(5):732–739. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2022.23.5.732-739>
2. Савиных П.А., Турубанов Н.В. Исследование влияния конструктивно-технологических параметров горизонтального смесителя на показатели его рабочего процесса. *Техника и технологии в животноводстве*. 2022;(3):42–47. <https://doi.org/10.51794/27132064-2022-3-42>  
Savinykh P.A., Turubanov N.V. Research of Horizontal Mixer's Design-and-Technological Parameters Influence on its Workflow Indicators. *Machinery and Technologies in Livestock*. 2022;(3):42–47. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.51794/27132064-2022-3-42>
  3. Marczuk A., Sysuev V., Aleshkin A., Savinykh P., Turubanov N., Tomporowski A. Theoretical Studies of the Interaction Between Screw Surface and Material in the Mixer. *Materials*. 2021;14(4). <https://doi.org/10.3390/ma14040962>
  4. Marczuk A., Misztal W., Savinykh P., Turubanov N., Isupov A., Zyryanov D. Improving Efficiency of Horizontal Ribbon Mixer by Optimizing its Constructional and Operational Parameters. *Eksploatacja i Niezawodnosc*. 2019;21(2):220–225. <https://doi.org/10.17531/ein.2019.2.5>
  5. Сапа В.Ю. The Results of the Analysis of Studies of Structural and Operational Parameters of Impact Crushers for the Production of Farm Animal Feed. *3i: Intellect, Idea*. 2023;(1):185–190. [https://doi.org/10.52269/22266070\\_2023\\_1\\_185](https://doi.org/10.52269/22266070_2023_1_185)
  6. Савиных П.А., Турубанов Н.В., Мошонкин А.М. Определение оптимальных конструктивно-технологических параметров молотковой дробилки с решетами в торцевых поверхностях. *Агроинженерия*. 2023;25(5):17–22. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-5-17-22>  
Savinykh P.A., Turubanov N.V., Moshonkin A.M. Determination of Optimal Design and Technological Parameters of a Hammer Crusher with Sieves in end Surfaces. *Agricultural Engineering*. 2023;25(5):17–22. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-5-17-22>
  7. Ширококов В.И., Фёдоров О.С., Ипатов А.Г. Анализ качества измельчённого зерна при использовании дробилок открытого и закрытого типов. *Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии*. 2019;2(58):69–74. EDN: QHDVLE  
Shirobokov V.I., Fedorov O.S., Ipatov A.G. Analysis of Crushed Grain Quality when Using Crushers of Open and Closed Types. *The Bulletin of Izhevsk State Agricultural Academy*. 2019;2(58):69–74. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: QHDVLE
  8. Бесподенов Р.В., Федоренко И.Я., Землянухина Т.Н., Полковникова М.В., Ишков А.В. Исследование и моделирование взаимодействия молотков вертикальной дробилки с воздушно-зерновым слоем. *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2023;4(222):92–98. <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2023-222-4-92-98>  
Bespoldenov R.V., Fedorenko I.Ya., Zemlyanukhina T.N., Polkovnikova M.V., Ishkov A.V. Investigation and Modeling of Interaction of Hammers of a Vertical Crusher with Air-Grain Layer. *Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2023;4(222):92–98. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2023-222-4-92-98>
  9. Зиганшин Б.Г., Булатов С.Ю., Миронов К.Е., Рукавишников В.Н., Шкилев Н.П. Определение рабочей площади торцевых решет дробилки зерна с увеличенной сепарирующей поверхностью. *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2020;15(2):87–91. <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2020-87-91>  
Ziganshin B.G., Bulatov S.Yu., Mironov K.E., Rukavishnikova V.N., Shkilev N.P. Determination of the Working Area of the Edge Sieve of Grain Crusher with Increased Separating Surface. *Bulletin of the Kazan State Agrarian University*. 2020;15(2):87–91. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2020-87-91>
  10. Садов В.В., Сорокин С.А. Влияние плотности потока зернового материала на эффективность измельчения в молотковой дробилке. *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2022;(3):81–86. <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2022-209-3-81-86>  
Sadov V.V., Sorokin S.A. Influence of Grain Material Flow Density on Grinding Efficiency in a Hammer Crusher. *Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2022;(3):81–86. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2022-209-3-81-86>

11. Соболев А.А., Мельников П.А., Васильев А.В. Расчет траектории движения частицы в горизонтальном воздушном потоке при пневматической сепарации. *Грузовое и пассажирское автотехозайство*. 2013;(7):30–36. EDN: [REZUIF](#)  
Sobolev A.A., Melnikov P.A., Vasiliev A.V. The Calculation of the Particle Trajectory in the Horizontal Air Flow in the Air Separation. *Gruzovoe i Passazhirskoe Avtokhozyajstvo*. 2013;(7):30–36. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: [REZUIF](#)
12. Соболев А.А., Мельников П.А., Тютюнник А.О. Движение частиц в воздушном потоке. *Вектор науки Тольяттинского государственного университета*. 2011;3(17):82–86. EDN: [PFIYPR](#)  
Sobolev A.A., Melnikov P.A., Tyutyunnik A.O. The Movement of Particles in the Air Stream. *Vektor Nauki Tol'yatinskogo Gosudarstvennogo Universiteta*. 2011;3(17):82–86. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: [PFIYPR](#)
13. Шеметова О.М., Фадин Ю.М., Щендрыгина И.В. Движение частиц в воздушном потоке циклона. *Молодежный вестник Новороссийского филиала Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова*. 2023;3(3):40–44. URL: <https://rio-nb-bstu.science/ojs/index.php/vestnik-molod/article/view/250> (дата обращения: 25.10.2024).  
Shemetova O.M., Fadin Yu.M., Shchendrygina I.V. Movement of Particles in the Cyclone Air Stream. *Molodezhnyj Vestnik Novorossiyskogo Filiala Belgorodskogo Gosudarstvennogo Tekhnologicheskogo Universiteta im. V. G. Shukhova*. 2023;3(3):40–44. (In Russ., abstract in Eng.). Available at: <https://rio-nb-bstu.science/ojs/index.php/vestnik-molod/article/view/250> (accessed 25.10.2024).
14. Бурков А.И., Глушков А.Л., Лазыкин В.А., Мокиев В.Ю. Обоснование основных конструктивных параметров разделительной камеры пневмосепаратора с использованием различных методов расчета траекторий частиц в пневмосепарирующем канале. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2022;23(3):402–410. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2022.23.3.402-410>  
Burkov A.I., Glushkov A.L., Lazykin V.A., Mokiev V.Yu. Substantiation of the Main Design Parameters of the Separation Chamber of the Pneumatic Separator using Various Methods for Calculating Particle Trajectories in the Pneumoseparating Channel. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2022;23(3):402–410. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2022.23.3.402-410>
15. Баранов Н.Ф., Зыкин А.А., Булатов С.Ю. Исследование влияния вихревых камер на скорость воздушного потока в дробильной камере молотковой дробилки. *Вестник НГИЭИ*. 2012;4(11):185–196. EDN: [PCDRHF](#)  
Baranov N.F., Zykin A.A., Bulatov S.Y. Study of the Influence Swirl Cameras on Velocity of the Airstream in Grind To. *Bulletin of the NGIEI*. 2012;4(11):185–196. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: [PCDRHF](#)
16. Ведерников Я.Д., Зыкин А.А. Исследование аэродинамических режимов работы дробилки с торцевыми вихревыми камерами. *Advanced Science*. 2017;1(5):21. EDN: [ZCQMEF](#)  
Vedernikov Ya.D., Zykin A.A. [Investigation of Aerodynamic Modes of Operation of a Crusher with end Vortex Chambers]. *Advanced Science*. 2017;1(5):21. (In Russ.) EDN: [ZCQMEF](#)
17. Матвеев А.И., Винокуров В.Р. Экспериментальные исследования по интенсификации процессов измельчения в ступенчатой центробежной мельнице. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2019;24(2):56–63. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2019-24-2-5>  
Matveev A.I., Vinokurov V.R. Experimental Studies on the Intensification of Grinding Processes in a Step Centrifugal Mill. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2019;24(2):56–63. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2019-24-2-5>
18. Ushakov Y., Shakhov V., Asmankin E., Naumov D. Theoretical Study Results of Product Flow Management Process in Hammer-Type Shredder Working Chamber. *Engineering for Rural Development*. 2019:185–191. <https://doi.org/10.22616/ERDev2019.18.N231>
19. Киприянов Ф.А., Палицын А.В., Сухляев В.А., Белозеров С.А. Обоснование конструкции молотковой дробилки с возможностью регулирования параметров искусственно создаваемой рабочей атмосферы. *Вестник АПК Верхневолжья*. 2021;4(56):76–82. <https://doi.org/10.35694/YARCX.2021.56.4.013>

- Kupriyanov F.A., Palitsyn A.V., Salyaev V.A., Belozerov S.A. [Substantiation of the Design of a Hammer Crusher with the Possibility of Regulating the Parameters of an Artificially Created Working Atmosphere]. *Bulletin of the Agroindustrial Complex of the Upper Volga region*. 2021;4(56):76–82. (In Russ.) <https://doi.org/10.35694/YARCX.2021.56.4.013>
20. Иванов И.И., Сухляев В.А., Сухопаров А.И. Исследование молотковой дробилки при осевой и радиальной подаче зерна. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2021;6(108):114–118. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.108.6.080>
- Ivanov I.I., Sukhlyaev V.A., Sukhoparov A.I. Hammer Mill Research for Axial and Radial Grain Feed. *International Research Journal*. 2021;6(108):114–118. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.108.6.080>

*Об авторах:*

**Савиных Петр Алексеевич**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией механизации животноводства Федерального аграрного научного центра Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого (610007, Российская Федерация, г. Киров, ул. Ленина, д. 166а), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0524-9721>, Researcher ID: V-6933-2017, Scopus ID: 56728791200, SPIN-код: 5868-9317, peter.savinyh@mail.ru

**Турубанов Николай Валентинович**, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник Федерального аграрного научного центра Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого (610007, Российская Федерация, г. Киров, ул. Ленина, д. 166а), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1446-6851>, Scopus ID: 57192554417, SPIN-код: 2628-1001, nikolaytu@mail.ru

**Алешкин Алексей Владимирович**, доктор технических наук, профессор кафедры механики и инженерной графики Вятского государственного университета (610000, Российская Федерация, г. Киров, ул. Московская, д. 36), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6949-1480>, Researcher ID: ABA-6228-2020, Scopus ID: 57190028500, SPIN-код: 5084-5478, usr00008@vyatsu.ru

**Сухляев Владимир Александрович**, старший преподаватель кафедры технических систем в агробизнесе Вологодской государственной молочнохозяйственной академии имени Н. В. Верещагина (160555, Российская Федерация, г. Вологда, с. Молочное, ул. Шмидта, д. 2), ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0218-2105>, Researcher ID: KИH-9009-2024, SPIN-код: 2773-8480, 227804@mail.ru

*Заявленный вклад авторов:*

П. А. Савиных – контроль, лидерство и наставничество в процессе планирования и проведения исследования; формулирование идеи исследования, целей и задач.

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

А. В. Алешкин – контроль, лидерство и наставничество в процессе планирования и проведения исследования; осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов, сбор данных и доказательств.

В. А. Сухляев – применение статистических, математических, вычислительных формальных методов для анализа данных исследования; осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов, сбор данных и доказательств.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*Поступила в редакцию 19.09.2024; поступила после рецензирования 04.10.2024;  
принята к публикации 11.10.2024*

*About the authors:*

**Petr A. Savinykh**, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, Head of the Laboratory of Mechanization of Livestock Production, Federal Agrarian Scientific Center of the North-East named after N. V. Rudnitsky (166a Lenin St., Kirov 610007, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0524-9721>, Researcher ID: V-6933-2017, Scopus ID: 56728791200, SPIN-code: 5868-9317, peter.savinyh@mail.ru

**Nikolay V. Turubanov**, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, Senior Researcher, Federal Agrarian Scientific Center of the North-East named after N. V. Rudnitsky (166a Lenin St., Kirov 610007, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1446-6851>, Scopus ID: 57192554417, SPIN-code: 2628-1001, nikolaytu@mail.ru

**Aleksey V. Aleshkin**, Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Department of Mechanics and Engineering Graphics, Vyatka State University (36 Moskovskaya St., Kirov 610000, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6949-1480>, Researcher ID: ABA-6228-2020, Scopus ID: 57190028500, SPIN-code: 5084-5478, usr00008@vyatsu.ru

**Vladimir A. Suhlyayev**, Senior Lecturer in the Department of Technical Systems in Agribusiness, Vologda State Dairy Academy named after N. V. Vereshchagin (2 Schmidt St., Molochnoye, Vologda 160555, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0218-2105>, Researcher ID: KIH-9009-2024, SPIN-code: 2773-8480, 227804@mail.ru

*Authors contribution:*

P. A. Savinykh – supervising and mentoring in planning and conducting the study; formulating the ideas, aims and objectives of the study.

N. V. Turubanov – conducting the study including performing the experiments, collecting data and evidence; preparing and presenting the manuscript, visualizing the study data and findings.

A. V. Aleshkin – supervising and mentoring in planning and conducting the study; formulating the ideas, aims and objectives of the study; conducting the study including performing the experiments, collecting data and evidence.

V. A. Suhlyayev – using statistical, mathematical, computational formal techniques to analyze the study data; conducting the study including performing the experiments, collecting data and evidence.

*All authors have read and approved the final manuscript.*

*Submitted 19.09.2024; revised 04.10.2024; accepted 11.10.2024*

**ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ /  
TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT**<https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202501.084-100>EDN: <https://elibrary.ru/ornvyx>

УДК 631.361.6

ISSN Print 2658-4123

ISSN Online 2658-6525

<https://vestnik.mrsu.ru>*Оригинальная статья / Original article***Экспериментальное исследование  
и оптимизация скорости резания для повышения  
эффективности малогабаритного дискового  
измельчителя растительных остатков****В. В. Красовский , Ю. Б. Гербер***Агротехнологическая академия Крымского федерального  
университета имени В. И. Вернадского  
(г. Симферополь, Российская Федерация)* [vitaliy-krasovskiy@mail.ru](mailto:vitaliy-krasovskiy@mail.ru)**Аннотация**

*Введение.* Утилизация растительных остатков в садоводстве является важной задачей, а малогабаритные измельчители – эффективным ее решением. Существующие малогабаритные измельчители веток и лозы часто демонстрируют низкую производительность и высокое энергопотребление, что ограничивает их широкое применение в малых хозяйствах. Влияние скорости резания на производительность и энергопотребление таких измельчителей остается недостаточно изученным, а имеющиеся сведения противоречивы. Данное исследование направлено на выявление оптимальных режимов работы дискового измельчителя, минимизирующих энергозатраты при достижении необходимой производительности.

*Цель исследования.* Обосновать конструктивные и режимные параметры малогабаритного измельчителя путем определения зависимостей влияния скорости резания рабочего органа на производительность и энергозатраты.

*Материалы и методы.* Исследования проводились на специально разработанной лабораторной установке, представляющей собой малогабаритный дисковый измельчитель. Перед началом каждого эксперимента подготавливалось 15 образцов веток яблони диаметром от 10 до 50 мм. Ветки были разделены на три группы: до 20 мм, 20–30 мм и 30–50 мм. Массовая доля влаги в образцах составляла 45–50 %, а температура древесины не опускалась ниже 20 °С. При каждом опыте фиксировались следующие показатели: время измельчения каждого образца, время холостого хода установки, масса измельченной древесины, энергопотребление в процессе измельчения. Эксперименты проводились для каждой из трех групп веток при трех различных скоростях вращения рабочего органа и трех вариантах его массы. Всего было проведено 135 экспериментов. Полученные данные анализировались с помощью программ Excel, STATISTICA 10 и Mscad. Для оценки статистической значимости результатов использовался t-критерий Стьюдента, для определения нормальности распределения – критерий Шапиро-Уилка. Корреляционную зависимость между показателями установили с помощью коэффициента корреляции Пирсона для нормально распределенных данных.

© Красовский В. В., Гербер Ю. Б., 2025

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

**Результаты исследования.** Получена регрессионная модель, описывающая взаимосвязь между производительностью и энергозатратами с учетом скорости резания. Установлены зависимости для различных диаметров веток, что позволило оптимизировать параметры работы измельчителя.

**Обсуждение и заключение.** Экспериментальные данные подтвердили важность оптимизации малогабаритных измельчителей для повышения их эффективности и снижения энергозатрат. Результаты работы могут быть использованы для разработки более экономичных и эффективных моделей измельчителей, что окажет положительное влияние на эколого-экономическую ситуацию в сельском хозяйстве.

**Ключевые слова:** дисковый измельчитель, малогабаритный измельчитель, скорость резания, оптимизация параметров, регрессионный анализ

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Красовский В.В., Гербер Ю.Б. Экспериментальное исследование и оптимизация скорости резания для повышения эффективности малогабаритного дискового измельчителя растительных остатков. *Инженерные технологии и системы*. 2025;35(1):84–100. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202501.084-100>

## Experimental Study and Optimization of Shredding Speed to Improve the Efficiency of Small-Sized Disc Shredder for Plant Residues

V. V. Krasovskiy ✉, Y. B. Gerber  
*Agrotechnology Academy V. I. Vernadsky  
Crimean Federal University  
(Simferopol, Russian Federation)*

✉ [vitaliy-krasovskiy@mail.ru](mailto:vitaliy-krasovskiy@mail.ru)

### Abstract

**Introduction.** Utilization of plant residues in gardening is an important problem, and using small-sized shredders is an effective solution for it. Existing small-sized shredders of branches and vines often demonstrate poor performance and high energy consumption that restricts the application of them in small farms. The effect of shredding speed on the performance and energy consumption of the shredders is insufficiently studied and the available data are contradictory. The study focuses on finding the optimal operating modes for a disc shredder operation to minimize energy consumption while achieving the required performance.

**The Aim of the Study.** The study is aimed at substantiating the design and operating parameters of a small-sized shredder by determining the dependencies of the effect of the shredding speed of the shredder working element on the disk shredder performance and energy consumption.

**Materials and Methods.** The studies were conducted on a specially designed laboratory setup, which was a small-sized disc shredder. For each experiment, there were taken 15 samples of apple tree branches with a diameter of 10 to 50 mm. The branches were divided into three bunches: up to 20 mm, 20–30 mm and 30–50 mm. The mass fraction of moisture in the samples was 45–50%, and the temperature of the wood did not fall below 20°C. For each experiment there were recorded the following parameters: the time of shredding each sample, the setup idle run time, the mass of shredded wood, and energy consumption during the shredding process. The experiments were carried out for each of the three bunches of branches at three different rotation speeds of the working element and three variants of its mass. There were conducted 135 experiments. The data obtained were analyzed using the programs Excel, STATISTICA 10 and Matcad. There were used Student's t-test to assess the statistical significance of the results and the

Shapiro-Wilk test to determine the normality of distribution. The correlation dependence between the indicators was determined using the Pearson correlation coefficient for normally distributed data.

*Results.* There has been developed a regression model to describe the relationship between performance and energy consumption depending on the shredding speed. There have been found dependencies for different branch diameters that made it possible to optimize the operating parameters of the shredder.

*Discussion and Conclusion.* The experimental data have confirmed the importance of optimizing small-sized shredders to increase their efficiency and reduce energy consumption. The results of the work can be used to develop more economical and efficient shredder models, which will have a positive impact on the environmental and economic situation in agriculture.

**Keywords:** disc shredder, small shredder, shredding speed, parameter optimization, regression analysis

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

**For citation:** Krasovskiy V.V., Gerber Y.B. Experimental Study and Optimization of Shredding Speed to Improve the Efficiency of Small-Sized Disc Shredder for Plant Residues. *Engineering Technologies and Systems*. 2025;35(1):84–100. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202501.084-100>

**Введение.** Согласно Указу Президента РФ от 21 января 2020 г. № 20 «Об утверждении Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации» и федеральной научно-технической программе развития сельского хозяйства на 2017–2025 гг., приоритетным направлением развития страны является обеспечение продовольственной безопасности и конкурентоспособности российского агропромышленного комплекса<sup>1</sup> [1]. Это требует развития инновационных технологий для повышения эффективности и снижения затрат в сельском хозяйстве, в том числе в садоводстве и виноградарстве. Утилизация обрезков (веток, лозы) остается сложной задачей. Традиционные методы (например, сжигание и вывоз) неэффективны и негативно влияют на окружающую среду.

Малогабаритные измельчители представляют актуальность для исследований, поскольку они соответствуют потребностям малых садоводческих хозяйств, широко распространенных в Крыму и Южных регионах России. Такие хозяйства часто ограничены в ресурсах, а использование крупногабаритной техники для них экономически и функционально нецелесообразно. Компактные устройства обеспечивают доступность и эффективность переработки растительных отходов и возможность интеграции в небольшие производственные процессы. Применение малогабаритных измельчителей позволяет внедрить действенный локальный способ решения этой проблемы, повышая эффективность использования ресурсов и снижая экологический след<sup>2</sup> [2]. Однако существующие малогабаритные измельчители часто демонстрируют низкую производительность, ограниченные возможности обработки материала и высокое

<sup>1</sup> Доктрина продовольственной безопасности Российской Федерации [Электронный ресурс]. URL: <https://mcx.gov.ru/upload/iblock/3e5/3e5941f295a77fdcfed2014f82ecf37f.pdf> (дата обращения: 12.08.2024).

<sup>2</sup> Рекомендации по утилизации и использованию отработанной биомассы садов и ягодников в Республике Беларусь : науч.-практ. изд. / сост. В. А. Самусь [и др.]. Самохваловичи, 2011. 24 с.

энергопотребление. В связи с этим проведение экспериментальных исследований малогабаритного измельчителя, направленных на оптимизацию конструктивных и технологических параметров для повышения производительности и снижения энергопотребления, является актуальной задачей и представляет значительный интерес.

Целью исследования является экспериментальное изучение влияния скорости резания на производительность и энергопотребление малогабаритного дискового измельчителя с последующим определением оптимальных режимов его работы и формированием практических рекомендаций.

**Обзор литературы.** Существующие технологии измельчения растительных остатков разнообразны, но мобильные измельчители наиболее распространены благодаря своей эффективности и минимальной потребности в дополнительном оборудовании [3]. Роликовые измельчители эффективны для крупных материалов, но громоздки. Молотковые измельчители подходят для мелких отходов, но менее производительны при обработке крупных. Дисковые измельчители благодаря универсальности, высокой производительности и качественному измельчению оптимальны для переработки широкого спектра материалов, включая создание мульчи и топливных брикетов.

Однако эффективность дисковых измельчителей зависит от многих факторов, включая геометрию режущего инструмента и режимные параметры [4; 5]. Малоножевые модели (например, FARMИ 260) менее эффективны из-за прерывистого резания, приводящего к неравномерной щепе и снижению производительности [5]. Оптимизация параметров дисковых измельчителей для эффективного производства щепы остается сложной задачей ввиду противоречивости существующих исследований [6].

Промышленные дисковые измельчители, используемые в лесотехнической промышленности, конструктивно наиболее близко подходят под задачи, стоящие перед сельскохозяйственными производителями, но они обладают высокой энергоемкостью и крупными габаритами, так как предназначены для измельчения древесины стволов деревьев. В связи с этим существует необходимость в разработке и экспериментальных исследованиях конструкции малогабаритного дискового измельчителя, предназначенного для работы в садах и виноградниках в условиях малых садоводческих хозяйств, где диаметр измельчаемых веток не превышает 50 мм.

Применение малогабаритных измельчителей обусловлено комплексным учетом технических, экономических и экологических факторов, характерных для малых садоводческих предприятий, распространенных в Крымском регионе и на юге России. Ограниченные ресурсы малых хозяйств требуют оборудования, сочетающего высокую эффективность переработки обрезных отходов с компактностью, обеспечивающей удобство транспортировки и эксплуатации, и низким энергопотреблением. Таким образом, предлагается комплексное решение проблемы утилизации растительных остатков, сочетающее экономическую эффективность и экологическую безопасность для малых садоводческих предприятий.

Анализ малогабаритных измельчителей, включая валковые, двухсекционные и роторные [7–9], показал ряд недостатков. Валковые измельчители имеют многоступенчатый процесс и ограничены в диаметре перерабатываемых веток ( $\leq 30$  мм). Двухсекционные измельчители требуют сортировки сырья и имеют низкую эффективность из-за раздельной обработки. Роторные измельчители также имеют минусы: неравномерное измельчение особенно твердых пород древесины диаметром более 30 мм, высокая стоимость и сложность конструкции [10, 11].

В таблице представлены результаты анализа характеристик существующих моделей малогабаритных измельчителей.

Таблица

Table

**Сравнительный анализ технических характеристик малогабаритных измельчителей**  
**Comparative analysis of technical characteristics of small-sized shredders**

Модель / Model	Производительность, м <sup>3</sup> /ч / Productivity, m <sup>3</sup> /h	Мощность двигателя, кВт / Engine power, kW	Тип режущего механизма / Cutting mechanism type	Максимальный диаметр веток, мм / Maximum diameter of branches, mm
Садовый измельчитель веток Draxter У-250 / Garden shredder Draxter U-250	0,80–1,00	2,2	Роторный / Rotary	35
ЗУБР ЗИЭ-44-2800 / ZUBR ZIE-44-2800	0,25	2,8	Зубчатое колесо / Gear	30
Измельчитель УТР-250 / Shredder UTR-250	0,80–1,00	2,2	Роторный / Rotary	40
Измельчитель валковый AL-KO Comfort LH 2810 Easy Crush / Roller shredder AL-KO Comfort LH 2810 Easy Crush	0,20	2,8	Валки / Rolls	42

Анализ существующих конструкций малогабаритных измельчителей, применяемых в малых хозяйствах, показал, что наибольшей производительностью (0,80–1,00 м<sup>3</sup>/ч) обладают модели с дисковым режущим механизмом. У измельчителей других конструкций производительность значительно ниже. Превышение производительности в 0,80–1,00 м<sup>3</sup>/ч для дисковых измельчителей часто оказывается нецелесообразным из-за избыточной мощности, увеличения стоимости и сложности конструкции. Однако все исследованные модели, независимо от конструкции, продемонстрировали неспособность эффективно измельчать крупные ветки диаметром 40–50 мм. Разрабатываемый нами измельчитель призван решить эту проблему, обеспечивая измельчение таких веток с сохранением производительности не ниже 0,80–1,00 м<sup>3</sup>/ч. Превышение этого значения нецелесообразно из-за увеличения стоимости и сложности конструкции.

Влияние скорости резания на эффективность измельчения древесины неоднозначно. При высоких скоростях перерезания древесины процесс носит ударный характер<sup>3</sup> [12], а в диапазоне 3,37–9,12 м/с скорость практически не влияет на удельную силу резания [13]. Однако исследования показывают противоречивые результаты: увеличение скорости до 33–55 м/с приводит к снижению удельной силы и работы резания, в это же время другие исследования показывают рост силы резания при увеличении скорости [14]. Это противоречие обусловлено разнообразием конструкций измельчителей [15] и различных технологических факторов [16]. В связи с этим проведение экспериментальных исследований малогабаритного измельчителя, а в частности влияния скорости резания на производительность и энергопотребление, является актуальной задачей.

**Материалы и методы.** Для решения поставленной задачи предлагается разработанная конструкция малогабаритного измельчителя растительных материалов [17].

Конструктивно измельчитель (рис. 1) состоит из загрузочной горловины 4, выгрузного отверстия 5. На корпусе 3 смонтированы подшипники 7, в которых установлен горизонтальный вал 8, на валу закреплен рабочий орган. Рабочий орган выполнен из металлического массивного диска 10, на котором устанавливаются ножи 11. Привод осуществляется от электродвигателя 9 через ременную передачу 1 и шкивы 2, электродвигатель и измельчитель монтируются на платформе 6. Установка также оборудована опорными колесами для перемещения.

Работа измельчителя растительных материалов заключается в следующем: измельчаемый материал через загрузочную горловину 4 подается под вращающиеся режущие ножи диска. Отрезаемая древесина распадается на отдельные элементы, которые удаляются из машины через выгрузное отверстие 1.

Разрабатываемая конструкция малогабаритного измельчителя обеспечивает эффективное использование механической энергии при измельчении растительных материалов. Измельчитель перерабатывает ветки диаметром до 50 мм без использования дополнительных измельчающих элементов, устройств подачи и выгрузки измельченной массы, тем самым достигая уменьшения энергоемкости технологического процесса, снижения стоимости изготовления измельчителя за счет простоты устройства.

Выявленное при анализе литературы разнообразие подходов к определению влияния скорости резания на производительность и энергозатраты измельчения веток и лозы предопределило структуру дальнейших исследований.

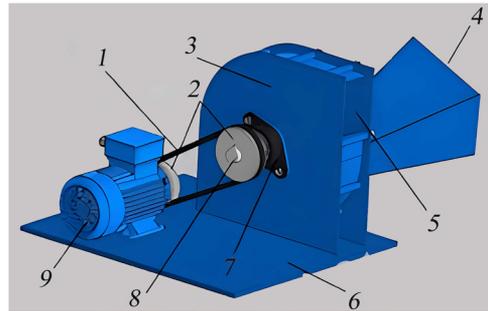
Частота вращения диска определяет скорость резания, влияет на динамику древесной массы, ограничивает производительность машины и ее потребляемую мощность [18].

Эксперимент был осуществлен в лабораториях Института «Агротехнологическая академия» Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Лабораторная установка изготовлена на основе разработанной конструкции малогабаритного измельчителя.

<sup>3</sup> Горячкин В. П. Собрание сочинений : в 3 т. / под ред. Н. Д. Лучинского. М. : Колос, 1965. Т. 3. 384 с.



а)



б)



в)

Р и с. 1. Малогабаритный измельчитель растительных материалов:  
 а) общий вид; б) модель измельчителя: 1 – ременная передача; 2 – шкивы; 3 – корпус;  
 4 – загрузочная горловина; 5 – выгрузное отверстие; 6 – платформа; 7 – подшипники;  
 8 – вал; 9 – электродвигатель; в) рабочий орган измельчителя:  
 10 – металлический массивный диск; 11 – ножи

F i g. 1. Small-sized shredder of plant materials:  
 а) general view; б) crusher model: 1 – belt drive; 2 – pulleys; 3 – body;  
 4 – loading neck; 5 – discharge opening; 6 – platform; 7 – bearings;  
 8 – shaft; 9 – electric motor;  
 в) crusher working element: 10 – massive metal disk; 11 – knives

*Источник:* а), в) фотографии сделаны В. В. Красовским при проведении экспериментальных исследований в лаборатории Агротехнологической академии Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского 10 мая 2024 г.; б) составлено авторами статьи.

*Source:* а), в) the photographs were taken by the V. V. Krasovsky during experimental studies in the laboratory of the Institute of Agrotechnological Academy of V. I. Vernadsky Crimean Federal University on 10 May 2024; б) compiled by the authors of the article.

Частота вращения рабочего органа изменялась при помощи установки шкивов на вал диска различного диаметра. Для измерения энергопотребления использовался лабораторный ваттметр, который подключался к электросети измельчителя. Для контроля точности и надежности данных измерения одновременно проводились с помощью токоизмерительных клещей НТ208D, которые фиксировали ток, и счетчика электроэнергии СЕ308-S34 СПОДЭС/DLMS, который учитывал общее потребление энергии за время эксперимента.

Для проведения экспериментальных исследований была разработана методика, основанная на использовании опытной установки. В конструкции лабораторной установки учтено изменение передаточного отношения ременного привода и, следовательно, скорости резания. Также конструкцией предусмотрено изменение массы рабочего органа за счет установки дополнительных грузов на рабочий орган.

В рамках каждого эксперимента было подготовлено 15 образцов веток с различным диаметром, варьирующимся от 10 до 50 мм. Древесина использовалась без признаков гнили, с уровнем окорки не менее 90 %. Массовая доля влаги в образцах составляла 45–50 %, а температура древесины не опускалась ниже 20 °С. Для проведения экспериментов выбирались ветки яблони как наиболее распространенной садовой культуры в регионе с твердостью в пределах 550–630 кг/м<sup>3</sup>.

Ветки измерялись, взвешивались до и после измельчения. По разности массы до измельчения и после определялась измельченная масса. При переработке веток фиксировалось время измельчения и время работы холостого хода измельчителя, что позволило определить производительность. Энергопотребление замерялось при каждом измельчении веток.

По диаметру ветки были распределены на три группы: до 20 мм, 20–30 мм, 30–50 мм. Расчетное значение массы рабочего органа и скорости резания веток, обеспечивающие необходимый запас маховой энергии [17; 19] для перерезания веток диаметром до 50 мм для малогабаритного измельчителя, были определены согласно проведенному анализу литературы<sup>4</sup> [15; 19]. Шкивы обеспечивали частоту вращения рабочего органа от 2 000 до 2 800 мин<sup>-1</sup> с интервалом в 400 мин<sup>-1</sup>, что соответствует линейной скорости резания в пределах от 31,40 до 43,96 м/с. Эксперимент спланирован по трехточечной схеме, где варьируется только один фактор: скорость резания. Уровни варьирования фактора: нижний уровень (–1) – 31,40 м/с; средний уровень (0) – 37,68 м/с; верхний уровень (+1) – 43,96 м/с.

Для увеличения точности полученных данных эксперименты проводились для трех вариантов массы рабочего органа: от 10,6 до 12,6 кг с шагом в 1 кг. Каждый эксперимент проводился на 15 образцах веток при трех различных массах рабочего органа и трех скоростях его работы. В результате было проведено 135 экспериментов.

Для анализа данных использовались программы Excel, STATISTICA 10 и Matcad.

Статистический анализ осуществлялся с помощью программы StatTech v. 4.2.7 от ООО «Статтех» (Россия). Количественные параметры проверялись на нормальное распределение с помощью критерия Шапиро-Уилка. Корреляционную зависимость между показателями определяли с использованием коэффициента корреляции Пирсона для нормальных данных.

**Результаты исследования.** Разработана прогностическая модель, описывающая зависимость энергоемкости от скорости резания рабочего органа с использованием метода парной квадратичной регрессии. Разработанная модель адекватно описывает взаимосвязь между скоростью резания ( $x$ ) и энергоемкостью ( $y$ ). Коэффициент детерминации ( $R^2$ ) составил 0,996, что указывает на то, что модель объясняет 99,6 % дисперсии энергоемкости. Для оценки статистической значимости модели был

<sup>4</sup> Гончаров В. Н., Гаузе А. А., Аввакумов М. В. Основы теории и расчета оборудования для подготовки бумажной массы. Ч. 2. Рубительные машины : учеб. пособие. СПб. : СПбГТУРП, 2012. 50 с. *Technologies, machinery and equipment*

проведен  $F$ -тест, который показал ее высокую значимость:  $F(2,77) = 9625, p < 0,001$ . Скорректированный коэффициент детерминации (Adjusted  $R^2$ ) составил 0,993, что подтверждает хорошую объясняющую способность модели.

Проверка предположений регрессионного анализа не выявила серьезных нарушений. Анализ остатков (ошибок модели) показал их случайное распределение вокруг нуля (график остатков не представлен в статье, но был проанализирован), что свидетельствует о гомоскедастичности. Тест Дарбина-Уотсона показал значение 1,98 (отсутствие значимой автокорреляции остатков).

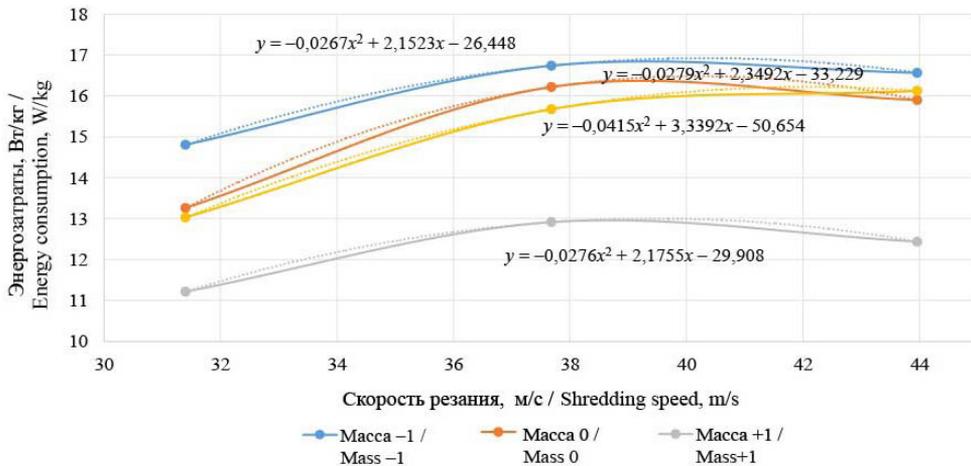
Наблюдаемая зависимость энергоемкости от скорости резания рабочего органа хорошо описывается уравнением парной квадратичной регрессии (рис. 2):

$$y = -0,0415x^2 + 3,3392x - 50,654, \quad (1)$$

где  $y$  – энергоемкость, Вт/кг;  $x$  – скорость резания, м/с.

В уравнении (1) отрицательный коэффициент при  $x^2$  ( $-0,0415$ ) указывает на наличие квадратичной зависимости, при которой скорость резания влияет на энергоемкость. Однако существует оптимальный диапазон скоростей, после которого дальнейшее увеличение скорости приводит к меньшему повышению энергоемкости. Положительный коэффициент при  $x$  ( $3,3392$ ) свидетельствует о том, что в начальном диапазоне скоростей увеличение скорости приводит к повышению энергоемкости.

Различия считались статистически значимыми при  $p < 0,05$ . Дополнительно был проведен корреляционный анализ взаимосвязи скорости резания рабочего органа и энергоемкости. Коэффициент корреляции Пирсона ( $r_{xy}$ ) составил 0,998, что соответствует очень высокой тесноте связи по шкале Чеддока. Уровень значимости корреляции ( $p$ ) составил 0,040, что свидетельствует о статистической значимости взаимосвязи ( $p < 0,05$ ).



Р и с. 2. График регрессионных функций, характеризующих зависимость энергоемкости от скорости резания рабочего органа

Fig. 2. A graph of regression functions characterizing the dependence of energy intensity on the working element shredding speed

Источник: здесь и далее графики для рисунков составлены авторами статьи.

Source: hereinafter in this article the diagrams are compiled by the authors of the article.

Анализ энергозатрат при измельчении веток разных диаметров показывает следующие тенденции (рис. 3):

1. Ветки диаметром более 30 мм. При скорости резания 31,4 м/с энергозатраты составляют 14,97 Вт/кг, при 37,68 м/с – 17,60 Вт/кг, а при 43,96 м/с – 19,01 Вт/кг.

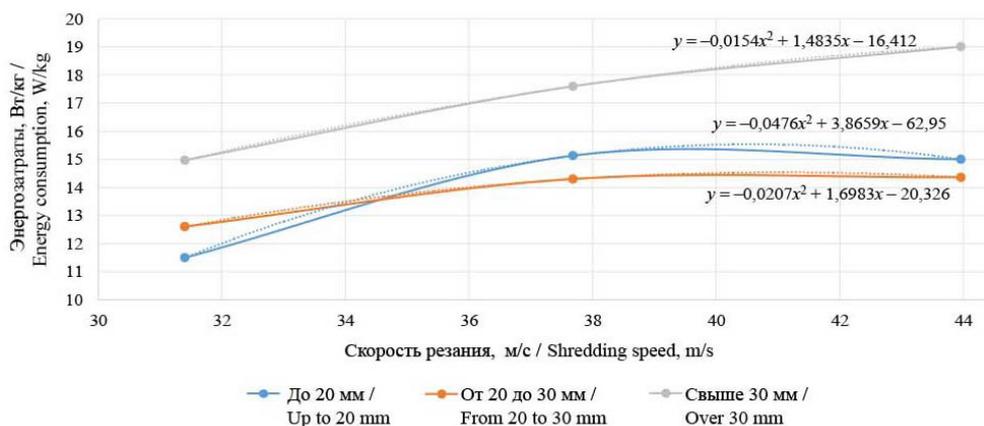
Как видно, с увеличением скорости резания энергозатраты возрастают, что соответствует увеличению интенсивности процесса измельчения более крупных веток, требующих больше энергии для их обработки.

2. Ветки диаметром 20–30 мм. При скорости резания 31,4 м/с энергозатраты составляют 12,61 Вт/кг, при 37,68 м/с – 14,30 Вт/кг, а при 43,96 м/с – 14,36 Вт/кг.

В этой группе веток наблюдается схожая тенденция, но рост энергозатрат с увеличением скорости резания менее выражен по сравнению с более крупными ветками. Это может быть связано с меньшей трудностью измельчения веток среднего диаметра.

3. Ветки диаметром до 20 мм. При скорости резания 31,4 м/с энергозатраты составляют 11,50 Вт/кг, при 37,68 м/с – 15,13 Вт/кг, а при 43,96 м/с – 15,24 Вт/кг.

Для мелких веток энергозатраты также увеличиваются с ростом скорости резания, но в целом они остаются ниже, чем для более крупных веток, что подтверждает необходимость меньших затрат энергии при измельчении более тонких материалов.



Р и с. 3. График регрессионных функций, характеризующих зависимость энергоемкости от скорости резания рабочего органа при измельчении различных диаметров веток

F i g. 3. A Graph of regression functions characterizing the dependence of energy consumption on the working element shredding speed when shredding branches of different diameters

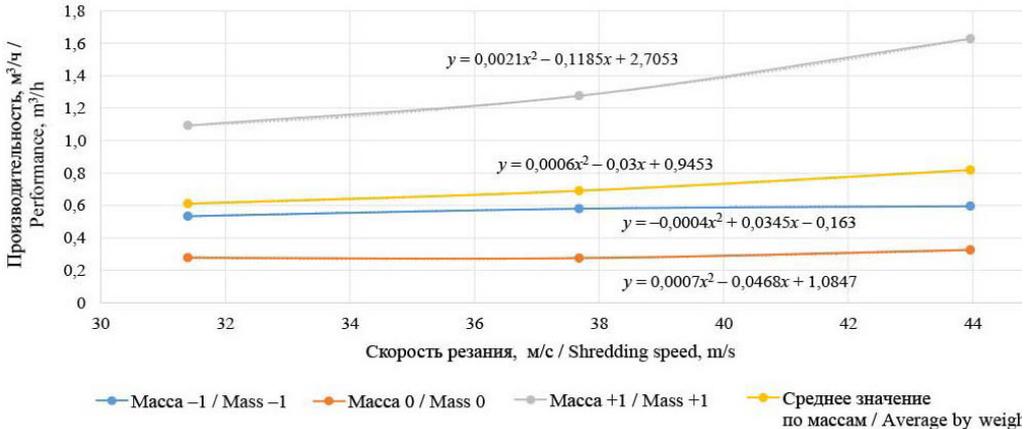
Таким образом, с увеличением диаметра веток и скорости резания наблюдается закономерный рост энергозатрат, что связано с необходимостью обработки большего объема древесной массы, требующего дополнительных усилий и энергии для измельчения. Корреляционный анализ взаимосвязи скорости резания рабочего органа и производительности измельчителя показал следующие результаты: коэффициент корреляции ( $r_{xy}$ ): 0,986; теснота связи по шкале Чеддока: очень высокая; уровень значимости ( $p$ ): 0,108.

При оценке связи скорости резания рабочего органа и производительности была установлена корреляционная связь.

Наблюдаемая зависимость производительности от скорости резания рабочего органа была смоделирована с помощью полиномиальной регрессии (рис. 4):

$$y = 0,0006x^2 - 0,03x + 0,9453, \quad (2)$$

где  $y$  – производительность, м<sup>3</sup>/ч;  $x$  – скорость резания, м/с.



Р и с. 4. График регрессионных функций, характеризующих зависимость производительности от скорости резания рабочего органа

F i g. 4. Graph of regression functions characterizing the dependence of productivity on the shredding speed

Результаты регрессионного анализа показали, что данная модель адекватно описывает взаимосвязь между скоростью резания и производительностью. Коэффициент детерминации ( $R^2$ ) составил 0,972, что указывает на объяснение 97,2 % дисперсии производительности данной моделью. Для оценки статистической значимости модели был проведен  $F$ -тест, который показал ее высокую значимость:  $F(2, 77) = 1337$ ,  $p < 0,001$ . Скорректированный коэффициент детерминации (Adjusted  $R^2$ ) составил 0,969, что подтверждает хорошую объясняющую способность модели.

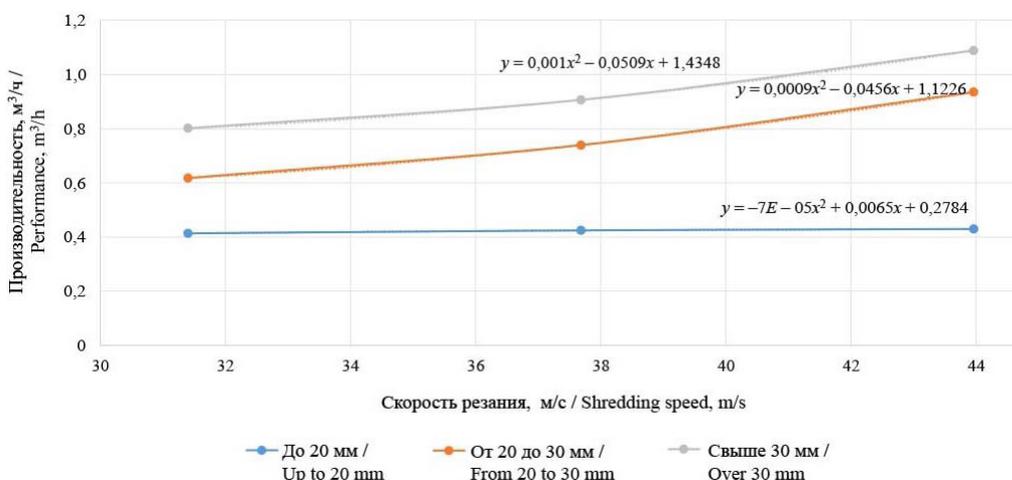
Проверка предположений регрессионного анализа выявила незначительные отклонения в распределении остатков. График остатков (не представлен в статье, но был проанализирован) демонстрирует случайное распределение точек вокруг нуля с небольшим сгущением в центральной части, что может указывать на легкую гетероскедастичность. Тест Дарбина-Уотсона показал значение 1,85 (отсутствие значимой автокорреляции остатков).

Уравнение (2) полиномиальной регрессии описывает квадратичную зависимость между скоростью резания и производительностью. Положительный коэффициент при  $x^2$  (0,0006) указывает на то, что производительность сначала может снижаться или оставаться относительно стабильной при небольшом увеличении скорости, но затем, при дальнейшем увеличении скорости, ее рост может ускориться. Отрицательный коэффициент при  $x$  (-0,03) предполагает начальное снижение производительности

при увеличении скорости в исследуемом диапазоне, прежде чем квадратичный эффект начнет преобладать. Интерпретация этих коэффициентов должна проводиться с учетом конкретных условий работы и диапазона скоростей резания. Увеличение скорости резания, несмотря на потенциальное повышение производительности, может быть ограничено другими факторами (энергопотребление и износ оборудования).

Так как уравнение имеет квадратичную форму, предполагается наличие оптимальной скорости резания, после которой дальнейшее увеличение может не приводить к пропорциональному увеличению производительности.

Проанализируем результаты, полученные для отдельных групп веток с различным диаметром (рис. 5). Для веток диаметром свыше 30 мм: при скорости резания 31,4 м/с производительность равна 0,8017 м<sup>3</sup>/ч; при скорости резания 37,68 м/с – 0,9067 м<sup>3</sup>/ч; при скорости резания 43,96 м/с – 1,0889 м<sup>3</sup>/ч.



Р и с. 5. График регрессионных функций, характеризующих зависимость производительности от скорости резания рабочего органа при измельчении различных диаметров веток

F i g. 5. Graph of regression functions characterizing the dependence of performance on the shredding speed when shredding branches of different diameters

Из данных видно, что с повышением скорости резания производительность возрастает. Это подтверждает, что увеличенная скорость резания позволяет измельчать более крупные ветки с возрастанием производительности, при этом поддерживается требуемый уровень от 0,8 м<sup>3</sup>/ч и выше.

Для веток диаметром 20–30 мм: при скорости резания 31,4 м/с производительность равна 0,6179 м<sup>3</sup>/ч; при скорости резания 37,68 м/с – 0,7395 м<sup>3</sup>/ч; при скорости резания 43,96 м/с – 0,9354 м<sup>3</sup>/ч. Здесь также наблюдается рост производительности с увеличением скорости резания. Однако максимальное значение производительности (0,9354 м<sup>3</sup>/ч) все еще ниже порогового значения в 1 м<sup>3</sup>/ч, но также соответствует целевому диапазону 0,8–1,0 м<sup>3</sup>/ч.

Для веток диаметром до 20 мм: при скорости резания 31,4 м/с производительность равна 0,4138 м<sup>3</sup>/ч; при скорости резания 37,68 м/с – 0,4246 м<sup>3</sup>/ч; при

скорости резания 43,96 м/с – 0,4300 м<sup>3</sup>/ч. Для веток меньшего диаметра увеличение скорости резания приводит к более слабо выраженному росту производительности. Несмотря на повышение скорости, производительность не достигает значений, близких к 0,8 м<sup>3</sup>/ч, что объясняется меньшим объемом измельчаемой массы.

Проанализировав данные, представленные на рисунке 5, можно сделать вывод, что для веток диаметром 30 мм и больше достигается производительность, соответствующая целевым значениям (0,80–1,00 м<sup>3</sup>/ч) при всех исследуемых скоростях резания. Для веток диаметром 20–30 мм производительность близка к целевому диапазону, но не превышает 1 м<sup>3</sup>/ч, что является приемлемым. Для веток диаметром до 20 мм производительность значительно ниже, что оправдано характеристиками измельчаемых материалов.

Таким образом, разрабатываемая конструкция малогабаритного измельчителя эффективно решает задачу измельчения крупных веток, поддерживая производительность на уровне, соответствующем целям (0,80–1,00 м<sup>3</sup>/ч) при оптимальных значениях скорости резания.

На основе проведенного анализа можно выделить следующие оптимальные диапазоны скоростей для каждой группы веток с учетом зависимостей от производительности и энергозатрат:

1. Для веток до 20 мм. В пределах скорости 30–35 м/с наблюдается рост производительности, при этом энергозатраты остаются умеренными. По уравнению энергозатрат для веток до 20 мм  $y = -0,0476x^2 + 3,8659x - 62,95y$ , где  $x$  – это скорость резания. При скорости 30 м/с энергозатраты составляют около 11,50 Вт/кг, а при скорости 35 м/с – около 13,10 Вт/кг. Таким образом, в диапазоне скорости 30–35 м/с можно достичь производительности около 0,42 м<sup>3</sup>/ч, что будет достаточно для данной группы веток, при этом энергозатраты остаются на уровне 11,5–13,0 Вт/кг.

2. Для веток 20–30 мм. Оптимальный диапазон скорости для этих веток находится в пределах 35–40 м/с, так как при этих значениях производительность увеличивается, а энергозатраты остаются на умеренном уровне. По уравнению энергозатрат для веток 20–30 мм  $y = -0,0207x^2 + 1,6983x - 20,326$ . При скорости 35 м/с энергозатраты составляют около 14,3 Вт/кг, а при скорости 40 м/с – около 14,9 Вт/кг. Производительность на скорости 35 м/с составляет около 0,74 м<sup>3</sup>/ч, а на 40 м/с – около 0,94 м<sup>3</sup>/ч. Таким образом, в диапазоне скорости 35–40 м/с можно обеспечить производительность от 0,74 до 0,94 м<sup>3</sup>/ч с энергозатратами в пределах 14,3–14,9 Вт/кг.

3. Для веток свыше 30 мм. Оптимальная скорость для этой группы веток будет в пределах 40–45 м/с, где производительность значительно возрастает, но энергозатраты остаются на допустимом уровне. По уравнению энергозатрат для веток свыше 30 мм  $y = -0,0154x^2 + 1,4835x - 16,412y$ . При скорости 40 м/с энергозатраты составляют около 15,1 Вт/кг, а при скорости 45 м/с – около 16,2 Вт/кг. Производительность при скорости 40 м/с составляет около 0,91 м<sup>3</sup>/ч, а при скорости 45 м/с – около 1,09 м<sup>3</sup>/ч. Таким образом, в диапазоне 40–45 м/с можно обеспечить производительность от 0,91 до 1,09 м<sup>3</sup>/ч с энергозатратами в пределах 15,1–16,2 Вт/кг.

**Обсуждение и заключение.** В ходе проведенного исследования были изучены конструктивные и технологические параметры малогабаритных измельчителей веток, а также их влияние на производительность и энергопотребление. Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Зависимость энергоемкости от скорости резания. При увеличении скорости резания рабочего органа наблюдается рост энергоемкости. Регрессионное уравнение, описывающее эту зависимость, имеет форму уравнения полиномиальной регрессии второй степени:  $y = -0,0415x^2 + 3,3392x - 50,654$ . Скорость резания оказывает значительное влияние на энергозатраты, однако характер зависимости указывает на то, что эффект увеличения скорости на энергоемкость снижается при высоких значениях скорости. Полученная модель объясняет 99,6 % наблюдаемой дисперсии, что подтверждает ее высокую точность.

2. Энергозатраты при измельчении веток различных диаметров. Для веток диаметром более 30 мм энергозатраты увеличиваются с ростом скорости резания, что подтверждает более высокие требования к энергии для измельчения крупных веток. Для веток диаметром 20–30 мм наблюдается менее выраженный рост энергозатрат с увеличением скорости резания. Для веток диаметром до 20 мм энергозатраты остаются относительно низкими по сравнению с более крупными ветками, но все же увеличиваются с ростом скорости.

3. Зависимость производительности от скорости резания. В результате корреляционного анализа была установлена зависимость производительности от скорости резания рабочего органа, описываемая уравнением полиномиальной регрессии:  $y = 0,0006x^2 - 0,03x + 0,9453$ . Производительность увеличивается с ростом скорости резания, но на высоких значениях скорости может наблюдаться замедление роста производительности. Уравнение объясняет 97,2 % дисперсии параметра производительности, что свидетельствует о высокой точности прогноза.

4. Производительность при измельчении веток различных диаметров. Для веток диаметром свыше 30 мм производительность увеличивается с ростом скорости резания и достигает целевых значений от 0,80 м<sup>3</sup>/ч и выше. Для веток диаметром 20–30 мм производительность близка к целевому диапазону, но не превышает 1,00 м<sup>3</sup>/ч. Для веток диаметром до 20 мм производительность остается значительно ниже, что связано с меньшим объемом измельчаемой массы.

5. Оптимальные диапазоны скоростей для разных групп веток. Ветки до 20 мм: оптимальная скорость резания 30–35 м/с с умеренными энергозатратами (11,5–13,0 Вт/кг). Ветки 20–30 мм: оптимальный диапазон скорости 35–40 м/с, производительность 0,74–0,94 м<sup>3</sup>/ч при энергозатратах 14,3–14,9 Вт/кг. Ветки свыше 30 мм: оптимальная скорость 40–45 м/с, производительность 0,91–1,09 м<sup>3</sup>/ч при энергозатратах 15,1–16,2 Вт/кг. Эти скорости обеспечат баланс между производительностью и энергозатратами для различных групп веток, соответствуя требованию на производительность 0,80–1,00 м<sup>3</sup>/ч при минимальных энергозатратах.

Для достижения оптимальной производительности и энергозатрат в зависимости от диаметра веток рекомендуется использовать диск – рабочий орган массой 10,5...11,8 кг с диапазоном скорости резания: для веток до 20 мм – 30...35 м/с; для веток 20–30 мм – 35...40 м/с; для веток свыше 30 мм – 40...45 м/с.

Дальнейшие исследования следует направить на определение оптимального диапазона скоростей резания, учитывающего не только производительность, но и другие важные эксплуатационные характеристики. Результаты работы могут быть использованы для создания более эффективных и устойчивых моделей измельчителей, что будет способствовать улучшению эколого-экономической ситуации в сельском хозяйстве.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Прокопьев М.Г. Продовольственная безопасность: анализ проекта доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации (часть II). *Региональные проблемы преобразования экономики*. 2018;(10):7–12. <https://doi.org/10.26726/1812-7096-2018-10-7-12>  
Prokopiev M.G. Food Security: Analysis of a Draft of the Doctrine of Food Security of the Russian Federation (Part II). *Regional Problems of Economic Transformation*. 2018;(10):7–12. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.26726/1812-7096-2018-10-7-12>
2. Брагинец С.В., Бахчевников О.Н., Алферов А.С. Результаты экспериментальных исследований измельчения высушенных волокнистых растительных материалов. *Инженерные технологии и системы*. 2021;31(4):591–608. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202104.591-608>  
Braginets S.V., Bakhchevnikov O.N., Alferov A.S. Experimental Data of Grinding Dried Fibrous Plant Materials. *Engineering Technologies and Systems*. 2021;31(4):591–608. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202104.591-608>
3. Фокин С.В., Медведева П.Ю., Фомина О.А. Изучение эффективности работы дисковой рубильной машины. *Аграрный научный журнал*. 2024;(9):147–154. <https://doi.org/10.28983/asj.y2024i9pp147-154>  
Fokin S.V., Medvedeva P.Yu., Fomina O.A. Study of the Efficiency of Disk Chopping Machines. *The Agrarian Scientific Journal*. 2024;(9):147–154. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.28983/asj.y2024i9pp147-154>
4. Pari L., Suardi A., Del Giudice A., Scarfone A., Santangelo E. Influence of Chipping System on Chipper Performance and Wood Chip Particle Size Obtained from Peach Prunings. *Biomass and Bioenergy*. 2018;112:121–127. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.01.002>
5. Малуков С.В., Аксенов А.А., Малукова М.А. Анализ конструкций и режимов работы дисковых рубильных машин. *Лесотехнический журнал*. 2021;11(4):139–149. <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/12>  
Malyukov S.V., Aksenov A.A., Malyukova M.A. Analysis of Designs and Operating Modes of Disc Chipping Machines. *Forestry Journal*. 2021;11(4):139–149. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/12>
6. Фокин С.В., Медведева П.Ю., Попиков В.П. Анализ конструктивных особенностей привода рубильных машин для измельчения энергетического древесного сырья. *Лесотехнический журнал*. 2024;14(1):95–115. <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/6>  
Fokin S.V., Medvedeva P.Yu., Popikov V.P. Analysis of Design Features of Chipper Drive for Chopping Energy Wood Raw Materials. *Forestry Journal*. 2024;14(1):95–115. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/6>
7. Лумисте Е.Г., Панова Т.В., Панов М.В., Шмигирилов С.И., Лумисте К.О. Измельчитель древесно-растительных отходов. Патент 111967 Российская Федерация. 10 января 2012. EDN: RCVFJW  
Lumiste E.G., Panova T.V., Panov M.V., Shmigirilov S.I., Lumiste K.O. [Wood and Plant Waste Shredder]. Patent 111967 Russian Federation. 2012 January 10. (In Russ.) EDN: RCVFJW
8. Панова Т.В., Слезко Е.И., Панов М.В., Гапонова В.Е. Измельчитель древесно-растительных отходов. Патент 209643 Российской Федерация. 17 марта 2022. URL: [https://i.moscow/patents/ru209643u1\\_20220317](https://i.moscow/patents/ru209643u1_20220317) (дата обращения: 27.10.2024).

- Panova T.V., Slezko E.I., Panov M.V., Gaponova V.E. [Wood and Plant Waste Shredder]. Patent 209643 Russian Federation. 2022 March 17. (In Russ.) Available at: [https://i.moscow/patents/ru209643u1\\_20220317](https://i.moscow/patents/ru209643u1_20220317) (accessed 27.10.2024).
9. Виллен Н., Донеи К. Измельчитель растительных материалов. Патент 2512309 Российская Федерация. 10 апреля 2014. EDN: ZNEBLY  
Villen N., Donay C. Grinder of Plant Materials. Patent 2512309 Russian Federation. 2014 April 10. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: ZNEBLY
  10. Кашкаров К.Г. Рубительная машина для переработки древесных отходов. Патент 194214 Российская Федерация. 3 декабря 2019. EDN: ESPNTY  
Kashkarov K.G. [Wood Waste Chipper]. Patent 194214 Russian Federation. 2019 December 3. (In Russ.) EDN: ESPNTY
  11. Капитонов А.В. Измельчитель растительных материалов. Патент 177952 Российская Федерация. 19 марта 2018.  
Kapitonov A.V. [Wood and Plant Waste Shredder]. Patent 209643 Russian Federation. 2018 March 19. (In Russ.)
  12. Ульянов В.М., Утолин В.В., Тугеев Д.Э., Ефремов Д.Н. Критерий рабочего процесса и конструкция измельчителя растительных материалов. *Вестник аграрной науки Дона*. 2023;16(1):66–75. [https://doi.org/10.55618/20756704\\_2023\\_16\\_1\\_66-75](https://doi.org/10.55618/20756704_2023_16_1_66-75)  
Ulyanov V.M., Utolin V.V., Tugeev D.E., Efremov D.N. Criterion of the Working Process and Design of a Feed Chopper. *Vestnik Agrarnoy Nauki Dona*. 2023;16(1):66–75. (In Russ., abstract in Eng.) [https://doi.org/10.55618/20756704\\_2023\\_16\\_1\\_66-75](https://doi.org/10.55618/20756704_2023_16_1_66-75)
  13. Фокин С., Шпортко О., Дручинин Д. On Shredding of Wood Raw Materials with Knives of Different Designs. *BIO Web of Conferences*. 2024;145:03012. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202414503012>
  14. Березников С.В., Фокин С.В. О методике исследования процесса резания порубочных остатков дисковой рубительной машиной, оснащенной различными типами ножей. *Современные проблемы науки и образования*. 2013;(5):93. EDN: RRJQRN  
Bereznikov S.V., Fokin S.V. About Research Methodology of Cutting Disk Forest Residues Chippers Equipped with Various Types of Knives. *Modern Problems of Science and Education*. 2013;(5):93. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: RRJQRN
  15. Фокин С.В., Фомина О.А. К обоснованию конструктивно-технологических параметров механизма выброса щепы из дисковой рубительной машины. *Лесной вестник*. 2021;25(2):99–107. URL: <https://clck.ru/3GST9e> (дата обращения: 25.10.2024).  
Fokin S.V., Fomina O.A. Energy Wood Production by Disk Cutting Machines with Different Methods of Chip Emission. *Forestry Bulletin*. 2021;25(2):99–107. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://clck.ru/3GST9e> (accessed 25.10.2024).
  16. Бирман А.Р., Угрюмов С.А., Локштанов Б.М., Орлов В.В. Экспериментальная технология и оборудование для производства древесной муки. *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. 2024;1(247):291–301. <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2024.247.291-301>  
Birman A.R., Ugryumov S.A., Lokshtanov B.M., Orlov V.V. Experimental Technology and Equipment for the Production of Wood Flour. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*. 2024;1(247):291–301. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2024.247.291-301>
  17. Гербер Ю.Б. Красовский В.В. Измельчитель растительных материалов. Патент 227371 U1 Российская Федерация. 18 июля 2024. EDN: TJADIS  
Gerber Yu.B. Krasovsky V.V. [Shredder of Plant Materials]. Patent 227371 U1 Russian Federation. 2024 July 18. (In Russ.) EDN: TJADIS
  18. Пирожков Д.Н., Лапин П.Н. Измельчители древесных отходов и растительных остатков. *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2023;8(226):84–89. <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2023-226-8-84-89>  
Pirozhkov D.N., Lapin P.N. Waste Wood and Plant Residue Chippers. *Bulletin of Altai State Agrarian University*. 2023;8(226):84–89. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2023-226-8-84-89>

19. Civitaresse V., Faugno S., Picchio R., Assirelli A., Sperandio G., Saulino L., et al. Production of Selected Short-Rotation Wood Crop Species and Quality of Obtained Biomass. *European Journal of Forest Research*. 2018;137:541–552. <https://doi.org/10.1007/s10342-018-1122-3>

*Об авторах:*

**Красовский Виталий Викторович**, кандидат технических наук, доцент кафедры общетехнических дисциплин Агротехнологической академии Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского (295492, Российская Федерация, г. Симферополь, п. Аграрное, ул. Научная, д. 1а), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5556-9531>, Researcher ID: KFB-1012-2024, SPIN-код: 4234-0138, [vitaliy-krasovskiy@mail.ru](mailto:vitaliy-krasovskiy@mail.ru)

**Гербер Юрий Борисович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологий и оборудования производства и переработки продукции животноводства Агротехнологической академии Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского (295492, Российская Федерация, г. Симферополь, п. Аграрное, ул. Научная, д. 1а), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3224-6833>, Researcher ID: B-6690-2019, SPIN-код: 2810-6112, [gerber\\_1961@mail.ru](mailto:gerber_1961@mail.ru)

*Заявленный вклад авторов:*

В. В. Красовский – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор данных; применение статистических, математических, вычислительных и других формальных методов для анализа данных исследования; создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования и полученных данных.

Ю. Б. Гербер – контроль, лидерство и наставничество в процессе планирования и проведения исследования; формулирование идеи исследования, целей и задач; разработка методологии исследования.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*Поступила в редакцию 18.10.2024; поступила после рецензирования 01.11.2024; принята к публикации 08.11.2024*

*About the authors:*

**Vitaliy V. Krasovskiy**, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of General Technical Disciplines, Agrotechnology Academy of V. I. Vernadsky Crimean Federal University (1a Nauchnaya St., Agrarian, Simferopol 295492, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5556-9531>, Researcher ID: KFB-1012-2024, SPIN-code: 4234-0138, [vitaliy-krasovskiy@mail.ru](mailto:vitaliy-krasovskiy@mail.ru)

**Yuriy B. Gerber**, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Technology and Equipment for the Production and Processing of Livestock Products, Agrotechnology Academy of V. I. Vernadsky Crimean Federal University (1a Nauchnaya St., Agrarian, Simferopol 295492, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3224-6833>, Researcher ID: B-6690-2019, SPIN-code: 2810-6112, [gerber\\_1961@mail.ru](mailto:gerber_1961@mail.ru)

*Authors contribution:*

V. V. Krasovsky – conducting the study including performing the experiments and collecting data; using statistical, mathematical, computational and other formal techniques to analyse the study data; preparing and presenting the manuscript; visualizing the study data and findings.

Yu. B. Gerber – supervising and mentoring in planning and conducting the study; formulating the ideas, aims and objectives of the study; developing the study methodology.

*All authors have read and approved the final manuscript.*

*Submitted 18.10.2024; revised 01.11.2024; accepted 08.11.2024*

**ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ /  
TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT**<https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202501.101-120>EDN: <https://elibrary.ru/orptue>

УДК 631.354.2

ISSN Print 2658-4123

ISSN Online 2658-6525

<https://vestnik.mrsu.ru>*Оригинальная статья / Original article***Агротехническая проходимость зерноуборочных  
комбайнов с комплектацией ведущих колес  
разными шинами****Л. В. Кравченко<sup>1</sup>✉, В. А. Кравченко<sup>1</sup>,  
В. В. Журба<sup>1</sup>, И. М. Меликов<sup>2</sup>**<sup>1</sup> *Донской государственный технический университет  
(г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)*<sup>2</sup> *Дагестанский государственный аграрный университет  
имени М. М. Джамбулатова  
(г. Махачкала, Российская Федерация)*✉ [Ljudmila.vl.kravchenko@yandex.ru](mailto:Ljudmila.vl.kravchenko@yandex.ru)**Аннотация**

*Введение.* Важным направлением развития сельскохозяйственного производства является повышение эксплуатационной эффективности колесной мобильной сельскохозяйственной техники. Анализ реальной ситуации показал, что существует ряд трудностей, связанных со многими факторами, в том числе с высокой массой техники, которая, наряду с увеличением производительности, способствует переуплотнению всех слоев почвенного основания, что приводит к снижению урожайности возделываемых культур и увеличению энергозатрат при последующей обработке. Наличие этих трудностей, несмотря на значительные успехи исследователей в этом направлении, не позволили до сих пор найти оптимальное решение проблемы, поэтому актуальность представляемых в работе материалов не вызывает сомнений.

*Цель исследования.* Оценка агротехнической проходимости отечественных зерноуборочных комбайнов пятого поколения при уборке озимой пшеницы.

*Материалы и методы.* При исследовании агротехнической проходимости зерноуборочных комбайнов был применен экспериментальный метод с использованием измерительного комплекса «шинный тестер» и других контрольно-измерительных приборов. В качестве объектов испытаний использовались двигатели комбайнов на шинах моделей Ф-136, Ф-179, Ф-81Э, Ф-81DP и фирмы «Cood Year» одинакового типоразмера 30,5-32.

*Результаты исследования.* Определили показатели агротехнической проходимости зерноуборочных комбайнов пятого поколения с комплектацией их колесных двигателей шинами разных моделей. Установили, что данные комбайны при определении по стандартным методикам максимальных давлений, оказываемых на почву и создаваемых на глубине в 50 см нормальных напряжений, не соответствуют ГОСТ Р 58655-2019 при любых вариантах комплектования шинами ведущих колес (за исключением установки экспериментальных шин при влажности почвы не более 0,5 НВ). Прямое измерение показателей агротехнической проходимости

© Кравченко Л. В., Кравченко В. А., Журба В. В., Меликов И. М., 2025

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

комбайнов показало, что по максимальным давлениям в контакте ведущих колес с почвой и создаваемым напряжениям на глубине 0,5 м комбайн пятого поколения при уборке зерновых колосовых в условиях Южного федерального округа выполняет требования ГОСТ Р 58655-2019 на всех сравниваемых шинах.

*Обсуждение и заключение.* Определение значений показателей агротехнической проходимости прямым измерением доказывает возможность применения современных комбайнов отечественного производства на уборке зерновых колосовых при комплектовании их двигателей радиальными (с оптимальным армированием внутреннего строения) и опытными диагонально-параллельными шинами. Результаты исследований необходимо учитывать при комплектовании шинами двигателей зерноуборочных комбайнов пятого поколения.

**Ключевые слова:** мобильная сельскохозяйственная техника, двигатель, шина, шинный тестер, показатели агропроходимости комбайна, напряжение в почве, плотность сложения почвы

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

**Для цитирования:** Кравченко Л.В., Кравченко В.А., Журба В.В., Меликов И.М. Агротехническая проходимость зерноуборочных комбайнов с комплектацией ведущих колес разными шинами. *Инженерные технологии и системы.* 2025;35(1):101–120. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202501.101-120>

## Agro Cross-Country Ability of Combine Harvesters with Driving Wheels Equipped with Different Tires

L. V. Kravchenko<sup>a</sup>✉, V. A. Kravchenko<sup>a</sup>,

V. V. Zhurba<sup>a</sup>, I. M. Melikov<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Don State Technical University  
(Rostov-on-Don, Russian Federation)

<sup>b</sup> Dagestan State Agricultural University  
named after M. M. Dzhambulatov  
(Makhachkala, Russian Federation)

✉ [Lyudmila.vl.kravchenko@yandex.ru](mailto:Lyudmila.vl.kravchenko@yandex.ru)

### Abstract

*Introduction.* An important area of agricultural industry development is improving the operating efficiency of wheeled mobile agricultural machinery. The real situation analyzing has shown the presence of a number of difficulties associated with many factors including high agricultural machine weight, which, along with increased performance, leads to the over-compaction of all soil layers that results in reduced yields of cultivated crops and increased energy consumption during subsequent processing. Despite the significant successes of domestic and foreign researchers and research teams in this area, these difficulties impede the development of an optimal solution to the problem. Therefore, the relevance of the materials presented in the work is beyond doubt.

*Aim of the Study.* The study is aimed at assessing of agro cross-country ability of the fifth-generation domestic combine harvesters when harvesting winter wheat.

*Materials and Methods.* In the study of the agro cross-country ability of combine harvesters, there was applied an experimental method using the measuring complex “tire tester” and other control and measuring devices. As the test objects there were used the propelling devices of the combines on the tires of the models F-136, F-179, F-81E, F-81DP and by the company “Cood year” of the same standard size 30.5-32.

*Results.* There were determined the indicators of agro cross-country ability of fifth-generation combine harvesters with the wheel propelling devices equipped with the tires of different models. Using standard methods for determining the maximum pressures on soil and normal stress at a depth of 50 cm, it has been found that these combines do not meet the requirements of GOST R 58655-2019 at any options of completion of driving wheels with tires (except for the installation of experimental tires when soil moisture is not more than 0.5 NV). Direct measurement of the indicators of agro cross-country ability of combine harvesters has shown that judging by the figures of the maximum pressures when driving wheels are in contact with soil and stress caused at a depth of 0.5 m, the fifth generation combine harvester in harvesting spike cereals in the conditions of the Southern Federal District meets the requirements of GOST R 58655-2019 on all compared tire.

*Discussion and Conclusion.* Identifying agro cross-country ability indicators through direct measuring has shown that it is possible to use modern domestic combine harvesters equipped with radial tires (with optimal reinforcement of the inner structure) and experimental diagonal-parallel tires for harvesting spike cereals. The results of the study should be taken into account when equipping of the fifth generation combine harvesters with tires.

**Keywords:** mobile agricultural machinery, propelling device, tire, tire tester, indicators of agro cross-country ability of the combine harvester, stress in the soil, soil density

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

**Acknowledgements:** The authors are grateful to anonymous reviewers whose comments and suggestions contributed to improving the quality of the submitted article.

**For citation:** Kravchenko L.V., Kravchenko V.A., Zhurba V.V., Melikov I.M. Agro Cross-Country Ability of Combine Harvesters with Driving Wheels Equipped with Different Tires. *Engineering Technologies and Systems*. 2025;35(1):101–120. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202501.101-120>

**Введение.** Основной задачей, стоящей перед работниками агропромышленного комплекса, является повышение эффективности производства продукции для населения и необходимого для промышленности сырья. Согласно стратегии устойчивого развития сельских территорий Российской Федерации до 2030 г. повышение эффективности производства сельскохозяйственной продукции требует технического перевооружения за счет внедрения новой и усовершенствованной мобильной сельскохозяйственной техники (МСТ). Наибольшее распространение в Российской Федерации получила МСТ на колесных движителях<sup>1</sup> [1; 2].

В Российской Федерации при уборке зерновых колосовых культур используются отечественные высокопроизводительные комбайны пятого поколения: *Торум-740*, *Асрос-530* и его модификации<sup>2</sup> [1; 2], обладающие большой переменной массой. Высокая масса МСТ негативно сказывается на изменении структуры и свойств почвы агрофонов, что приводит к снижению ее плодородия [3–5].

В соответствии с современными требованиями к движителям МСТ целесообразно оценивать их по агротехнической проходимости. Под данным термином [4] понимается способность машины перемещаться по поверхности поля с установленными требованиями по воздействию на почву, которые обуславливаются допустимым изменением ее физико-механических свойств без нарушения потенциального плодородия.

<sup>1</sup> Кононова Н. Н., Улезько А. В. Техничко-технологическая модернизация сельского хозяйства: условия и перспективы : моногр. Воронеж : ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2021. 195 с. EDN: EXCQLL

<sup>2</sup> Там же.

Нормируемыми показателями, характеризующими уплотняющее воздействие МСТ на почву, являются максимальные величины давлений их на поверхность агрофона и нормальных напряжений, возникающих в слоях почвы, которые полагаются на глубине до 50 см, после прохода агрегата.

Следует заметить, что обобщающим показателем, который характеризует потенциальное плодородие почвы, является ее объемная масса, то есть плотность сложения. Плотность сложения почвы выступает одним из главных регуляторов обеспечения растений доступными питательными веществами<sup>3</sup>.

Для разных почв существует предельное и допустимое по уплотнению значение плотности сложения почвы<sup>4</sup>. Например, для предкавказского карбонатного чернозема они соответственно составляют 1,45 г/см<sup>3</sup> и от 1,25–1,27 до 1,30 г/см<sup>3</sup> [6; 7]. Наиболее благоприятная для произрастания большинства сельскохозяйственных культур величина плотности сложения чернозема равна 1,15–1,17 г/см<sup>3</sup>. Следовательно, в зависимости от убираемой культуры – кормовая с последующим ее произрастанием и новым скашиванием или зерновая – допускаемое значение плотности сложения почвы в условиях Северного Кавказа может быть соответственно 1,17 или 1,27 г/см<sup>3</sup> [6]. Данные значения плотности сложения являются основными при оценке агротехнической проходимости зерноуборочных комбайнов пятого поколения в указанной зоне.

Целью исследования является оценка основных показателей, характеризующих агротехническую проходимость отечественных зерноуборочных комбайнов пятого поколения при уборке озимой пшеницы.

**Обзор литературы.** Исследования по определению влияния сельскохозяйственных машин на почву в нашей стране были начаты Н. А. Качинским и М. Х. Пигулевским еще в 20-х гг. прошлого столетия. В тот период на полях в основном использовалась мобильная техника с массой от 3 до 6 т. Находящаяся в эксплуатации современная техника имеет массу от 10 до 20 и более т, что приводит к значительному превышению допустимых норм, установленных стандартами [4].

Аналогичные случаи применения сверхтяжелой техники наблюдаются и в зарубежных странах<sup>5</sup> [8; 9].

С начала 70-х гг. XX в. с появлением на сельскохозяйственных полях мощных энергонасыщенных тракторов и высокопроизводительных комбайнов исследования по проблеме были продолжены учеными Агрофизического НИИ ВАСХНИЛ, ВИМ, Белорусской СХА, БИМСХ, Почвенного института имени В. В. Докучаева и других научных и учебных заведений<sup>6</sup> [10–12]. Однако полученные ими данные носят противоречивый характер.

<sup>3</sup> Кулен А., Куиперс Х. Современная земледельческая механика. Л.: Агропромиздат, 1986. 349 с.

<sup>4</sup> Наумов В. Д. География почв. Почвы России. Ч. 2: учебник. М.: РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева, 2022. 212 с.

<sup>5</sup> Кулен А., Куиперс Х. Современная земледельческая механика; Gill W. R. Economik Assessment of Soil Compaction. ASAE, 1977.

<sup>6</sup> Русанов В. А. Проблемы переуплотнения почв движителями и эффективные пути ее решения. М.: ВИМ, 1998. 368 с.; Романюк Н. Н. Снижение уплотняющего воздействия на почву мобильных энергосредств. Минск: БГАТУ, 2020. 200 с. URL: <https://clck.ru/3GmjJb> (дата обращения: 25.08.2024).

Результаты исследований показали, что ходовые системы мобильной техники деформируют почву в трех плоскостях [5; 7; 10]. В большей степени деформация почвы происходит по нормали к поверхности поля, что и определяет величину ее уплотнения. Деформация почвы в продольном направлении, вперед по ходу движения и в противоположную сторону, происходит за счет возникновения в контакте колеса с почвенным основанием нормальных и тангенциальных напряжений.

Характер и величину деформационного состояния почвы определяют конструктивные и эксплуатационные параметры шин [11; 12], режимы нагружения колесных движителей [13; 14], внутришинного давления [15] и ее физико-механические свойства [16].

Работы некоторых зарубежных исследователей<sup>7</sup> были выполнены с целью выявления влияния, которое оказывает уплотненная почва на процесс развития корней растений.

На основании результатов многочисленных исследований можно сделать вывод, что негативное воздействие современных зерноуборочных комбайнов на почву, в том числе и на подпахотные горизонты, в конечном итоге снижает урожайность возделываемых культур и повышает энергозатраты на последующую обработку агрофона. Однако реальные данные определения показателей агротехнической проходимости современных зерноуборочных комбайнов пятого поколения в настоящее время в научной литературе отсутствуют, тем более отсутствуют данные о показателях проходимости зерноуборочных комбайнов с различной комплектацией ходовых систем.

Критериями воздействия МСТ на почвенное основание стандартами ГОСТ Р 58656-2019<sup>8</sup>, ГОСТ 26954-2019<sup>9</sup>, ГОСТ Р 58655-2019<sup>10</sup> установлены значения максимальных давлений пневматических колес на почву и нормальные напряжения в ней на глубине 0,5 м.

На наш взгляд, по изменению объемной массы (плотности сложения), которая является совокупным интегральным показателем агрегатного состояния почвы, можно судить о величине негативного влияния МСТ на агрофон.

**Материалы и методы.** В качестве объекта исследования выступил процесс взаимодействия с агрофоном ходовых систем отечественных зерноуборочных комбайнов пятого поколения на шинах моделей Ф-136, Ф-179 фирмы «Cood Year», Ф-81Э (с оптимальным армированием волокон каркаса), Ф-81DP (предлагаемой нами к разработке и изготовлению [17]).

В процессе исследований был принят экспериментальный метод с использованием измерительного комплекса «шинный тестер» [18], а также автотракторных весов, планиметра, малогабаритных потенциометрических датчиков давлений движителя

<sup>7</sup> Кулен А., Куиперс Х. Современная земледельческая механика.; Gill W. R. Economik Assessment of Soil Compaction.

<sup>8</sup> ГОСТ Р 58656-2019. Техника сельскохозяйственная мобильная. Методы определения воздействия движителей на почву [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200169433> (дата обращения: 25.08.2024).

<sup>9</sup> ГОСТ 26954-2019. Техника сельскохозяйственная мобильная. Метод определения максимального нормального напряжения в почве [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200169046> (дата обращения: 25.08.2024).

<sup>10</sup> ГОСТ Р 58655-2019. Техника сельскохозяйственная мобильная. Нормы воздействия движителей на почву [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200169432> (дата обращения: 25.08.2024).

на почву и датчиков напряжений, возникающих в различных слоях почвы после прохода движителя, сушильных шкафов, весов аптекарских, осциллографа К-12-22, персонального компьютера и т. д. [19–21]. Предусматривалось определение основных показателей агротехнической проходимости (максимальные давления движителя на почву, напряжения, возникающие по слоям почвы, и плотность ее сложения в различных слоях) зерноуборочных комбайнов пятого поколения [22–24].

Ведущие колеса комбайна комплектовались поочередно шинами типоразмера 30,5-32 с различным внутренним строением оболочек, техническая характеристика которых представлена в таблице 1.

Т а б л и ц а 1

T a b l e 1

Техническая характеристика испытываемых шин  
Technical characteristics of the tested tires

Параметры шины / Tire Parameters	Значение параметров шин / The value of the tire parameters				
	Ф-136 / F-136 30,5L-32	Ф-179 / F-179 30,5L-32	«Good Year» 30,5L-32	Ф-81Э / F-81E 30,5R-32	Ф-81DP / F-81DP 30,5DP-32
Наружный диаметр, мм / Outer diameter, mm	1 926	1 798	1 861	1 825 ± 4	1 885 ± 4
Ширина профиля, мм / Profile width, mm	772	774	774	725	768
Шаг грунтозацепов, мм / The pitch of the ground grousers, mm	402	390	240	276	288
Высота грунтозацепов, мм / The height of the ground grousers, mm	80	50	45	65	46
Коэффициент насыщенности рисунка протектора / Saturation coefficient of the tread pattern	0,224	0,273	0,212	0,328	0,315
Масса, приходящаяся на шину, кг / Weight per tire, kg	6 875	6 790	6 750	6 850	6 850
Внутреннее давление воздуха, МПа / Internal air pressure, MPa			0,171		

На колеса управляемого моста комбайна были установлены шины типоразмера 18,4R-24.

Для обеспечения нагрузки на левое ведущее колесо комбайна, как наиболее нагруженное при полном бункере, производилось заполнение бункера комбайна балластными грузами [25]. Такая же нагрузочная масса на пневматический движитель устанавливалась и при испытаниях его на шинном тестере [18].

Полевые испытания комбайна и отдельно взятого движителя с испытываемой шиной на агротехническую проходимость проводились на стерне озимой пшеницы при строгом выполнении условий, определяемых стандартами ГОСТ 20915-2011<sup>11</sup> и ГОСТ 7057-2001<sup>12</sup> (табл. 2).

<sup>11</sup> ГОСТ 20915-2011. Испытания сельскохозяйственной техники. Методы определения условий испытаний [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200094197> (дата обращения: 25.08.2024).

<sup>12</sup> ГОСТ 7057-2001. Тракторы сельскохозяйственные. Методы испытаний [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200030186> (дата обращения: 25.08.2024).

**Показатели, характеризующие почву на стерне озимой пшеницы**  
**Indicators characterizing the soil on the stubble of winter wheat**

Показатели / Indicators	Значения / Values	
Микрорельеф поля, мм / Microrelief of the field, mm	4,60	
Высота стерни, см / Stubble height, cm	12	
Наличие пожнивных остатков, % / The presence of crop residues, %	3–4	
Влажность почвы в слоях, % / Soil moisture in layers, %	0–10 см / 0–10 cm	15,80
	10–20 см / 10–20 cm	18,30
	20–30 см / 20–30 cm	17,40
	30–40 см / 30–40 cm	18,50
	40–50 см / 40–50 cm	21
Плотность сложения почвы в слоях, г/см <sup>3</sup> / Soil compaction in layers, g/cm <sup>3</sup>	10–20 см / 10–20 cm	1,11
	20–30 см / 20–30 cm	1,18
	30–40 см / 30–40 cm	1,19
	40–50 см / 40–50 cm	1,24
	10–20 см / 10–20 cm	1,26

Движение комбайна и шинного тестера осуществлялось со скоростью 5...6 км/ч. Расстояние между соседними проходами 5...6 м.

Максимальное давление ведущего колеса комбайна на поверхность агрофона определялись по ГОСТ Р 28656-2019<sup>13</sup> и специально разработанной методике<sup>14</sup> [20; 25; 26].

Максимальное значение нормального давления ведущего колеса комбайна на поверхность агрофона  $q_{\max}^K$  по ГОСТ Р 28656-2019 определяют по зависимости:

$$q_{\max}^K = \frac{G_K K_2}{F_K K_1}, \text{ кПа}, \quad (1)$$

где  $G_K$  – вертикальная статическая нагрузка на колесо, кН;  $F_K$  – контурная площадь отпечатка шины колеса на бетоне, м<sup>2</sup>;  $K_1$  – коэффициент приведения контурной площади отпечатка шины колеса на бетоне к площади его контакта на поверхности агрофона (зависит от наружного диаметра шины);  $K_2 = 1,5$  – коэффициент, учитывающий неравномерность эпюры распределения давления по длине контакта.

Для определения величины максимального нормального напряжения (кПа), возникающего в почве на глубине 50 см под ведущим колесом, была применена формула<sup>15</sup>:

$$\sigma_{0,5} = 0,637\bar{q} \left[ \arctg \frac{ab}{h\sqrt{a^2 + b^2 + h^2}} + \frac{hab(a^2 + b^2 + 2h^2)}{(a^2 + h^2)(b^2 + h^2)\sqrt{a^2 + b^2 + h^2}} \right],$$

<sup>13</sup> ГОСТ Р 28656-2019. Газы углеводородные сжиженные. Расчетный метод определения плотности и давления насыщенных паров [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200163754> (дата обращения: 25.08.2024).

<sup>14</sup> Русанов В. А. Проблемы переуплотнения почв движителями и эффективные пути ее решения.

<sup>15</sup> ГОСТ 26954-2019. Техника сельскохозяйственная мобильная. Метод определения максимального нормального напряжения в почве.

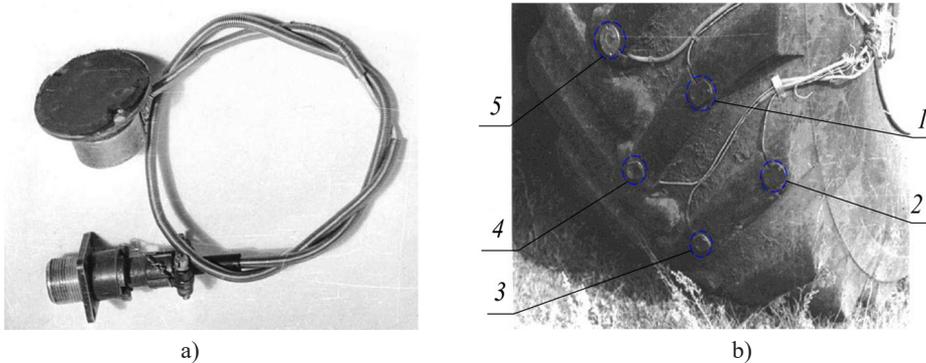
в которой

$$a = \frac{F_{\text{кп}}}{2b_{\text{к}}}, \quad b = \frac{b_{\text{к}}}{2},$$

где  $\bar{q}$  – среднее давление единичного колеса на опорное основание, кПа;  $h$  – глубина опорного основания, м;  $b_{\text{к}}$  – максимальное значение ширины площади контакта шины с жестким опорным основанием, м.

Особенность специальной методики испытаний заключалась в том, что давление определялось в результате прямого измерения его величины на выступах грунтозацепов шин и во впадинах между ними при одновременном измерении фактической площади контакта.

Для этого устанавливались (рис. 1а) малогабаритные потенциометрические датчики [20; 25] на протекторе шин между их экваториальными и плечевыми зонами (рис. 1б). Для устранения влияния неравномерности почвенного фона и получения необходимой достоверности величины давления в контакте движителя с почвой, длина зачетного участка составляла 400...500 м, что обеспечивало 50...60-кратную повторность измерений.



Р и с. 1. Датчики контактного давления:

- а) общий вид датчиков контактного давления; б) установка датчиков контактного давления на шине движителя: 1, 2, 3, 4, 5 – размещение датчиков давления на шине
- F i g. 1. Contact pressure sensors:  
 а) general view of contact pressure sensors; б) installation of contact pressure sensors on the propelling device tire: 1, 2, 3, 4, 5 – placement of pressure sensors on the tire

*Источник:* фотографии сделаны И. М. Меликовым в 2023 г. при испытании комбайнов на агропроходимость при комплектации их шинами различного конструктивного исполнения.

*Source:* the photos were taken by I. M. Melikov in 2023 when testing agro cross-country ability of combine harvesters equipped with tires of various designs.

При определении значений средних давлений пневматического колеса на почву производился доленой учет показаний всех установленных на шине датчиков. Величина среднего давления определялась графоаналитическим интегрированием данных записей сигналов от каждого датчика.

По известным масштабам кривых сигналов на осциллографической ленте от всех датчиков можно достаточно точно получить размеры, форму и площадь контакта пневматического колеса с почвой.

Для определения средних давлений на почву выступами грунтозацепов  $q_{\text{выст}}$  и впадинами  $q_{\text{вп}}$  между ними было произведено разделение площади на 20–24 участка по длине контакта колеса с почвой:

$$q_{\text{выст}} = \frac{\sum_{i=1}^n q_i^{\text{выст}} l_i S_i}{\sum_{i=1}^n l_i S_i}; \quad q_{\text{вп}} = \frac{\sum_{i=1}^n q_i^{\text{вп}} l_i S_i}{\sum_{i=1}^n l_i S_i}, \quad (2)$$

где,  $l_i S_i$  – соответственно длина и ширина каждой площадки, м.

Среднее давление  $q_{\text{ср}}$  пневматического колеса на агрофон определялось с учетом выражения (1) по зависимости:

$$q_{\text{ср}} = \frac{q_{\text{выст}} F_{\text{выст}} + q_{\text{вп}} F_{\text{вп}}}{F_{\text{выст}} + F_{\text{вп}}}.$$

Для прямого измерения напряжений в слоях почвы (5; 10; 20; 30; 40 и 50 см) применялись специальные датчики 4 [20; 25], которые устанавливались с небольшим натягом в специальные углубления 5, сделанные в вертикально расположенной скважине 6 [20; 25] (рис. 2).

После установки в специальных углублениях (нишах) 5 датчиков и вывода измерительных проводов 2 на поверхность поля к записывающему устройству 3 скважина 6 закупоривалась беззвонно заглушкой 1. Это было необходимо для исключения осыпания почвы внутрь скважины при проходе над ней комбайна или шинного тестера.

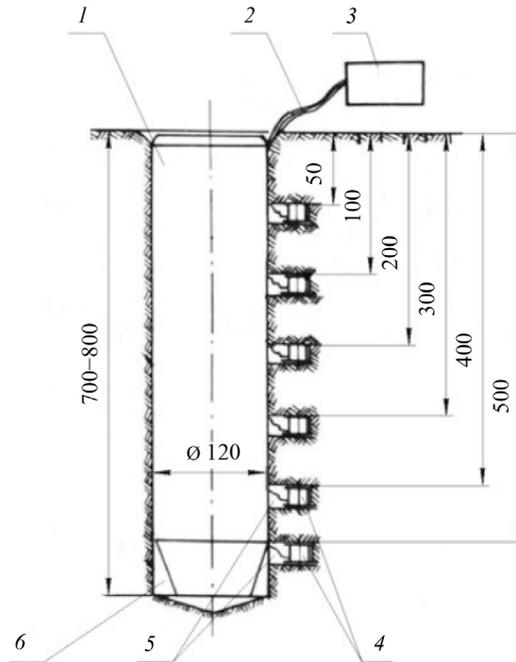
Вертикальные скважины на участке проведения испытаний выполнялись по одной линии с расстоянием между ними 25–30 м.

При движении комбайна или шинного тестера испытываемое колесо продольной осью перемещалось над скважиной, в которой располагались датчики напряжений. Запись показаний датчиков напряжений производили на расстоянии 10–12 м до подхода к первой скважине комбайна или шинного тестера, а оканчивали ее по мере удаления их от последней скважины на такое же расстояние. Повторность таких опытов для одного варианта испытываемой шины тридцатикратная.

Первичным материалом для установления величины давлений движителя комбайна на почву и нормальных напряжений в ее слоях являлись осциллограммы, которые обрабатывались на персональном компьютере по имеющемуся в нем программном обеспечении.

Влажность почвы и ее объемная масса определялись по методике Национального стандарта Российской Федерации ГОСТ Р 53764-2009 (ИСО 11461:2001)<sup>16</sup> [6; 7].

<sup>16</sup> ГОСТ Р 53764-2009 (ИСО 11461:2001). Качество почвы. Определение содержания почвенной влаги в виде объемной доли с применением трубок для отбора пробы грунта. Гравиметрический метод [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200076671> (дата обращения: 25.08.2024).



Р и с. 2. Схема размещения датчиков для прямого измерения напряжений в слоях почвы:

1 – заглушка; 2 – измерительные провода; 3 – записывающее устройство; 4 – датчики напряжений; 5 – специальные углубления; 6 – скважина

Fig. 2. Layout of sensors for direct measurement of stresses in soil layers:

1 – plug; 2 – measuring wires; 3 – recording device; 4 – voltage sensors; 5 – special recesses; 6 – borehole

Источник: здесь и далее рисунки составлены авторами статьи.

Source: hereinafter in this article the diagrams are compiled by the authors of the article.

**Результаты исследования.** Для определения значений величин максимального давления движителя комбайна на почвенное основание по стандартной методике<sup>17</sup> были последовательно определены (табл. 3, 4) контурная площадь контакта колеса [23; 26] с помощью планиметра, площадь контакта движителя комбайна со стерней озимой пшеницы, среднее и максимальные давления комбайна на почвенное основание.

Приведенные в таблице 3 значения площади контакта сравниваемых вариантов шин на жестком опорном основании  $F_k$  и на стерне озимой пшеницы  $F_{кп}$  свидетельствуют о том, что шина модели Ф-179 несколько уступает шине Ф-136. Причиной этого является повышенная у последней глубина рисунка протектора (высота грунтозацепов). При качении колеса высокие грунтозацепы образуют большую по сравнению с низкими длину и площадь контакта с почвой.

<sup>17</sup> ГОСТ Р 58656-2019. Техника сельскохозяйственная мобильная. Методы определения воздействия движителей на почву.

## Площади контакта шин с опорным основанием

## The contact area of the tires with the support base

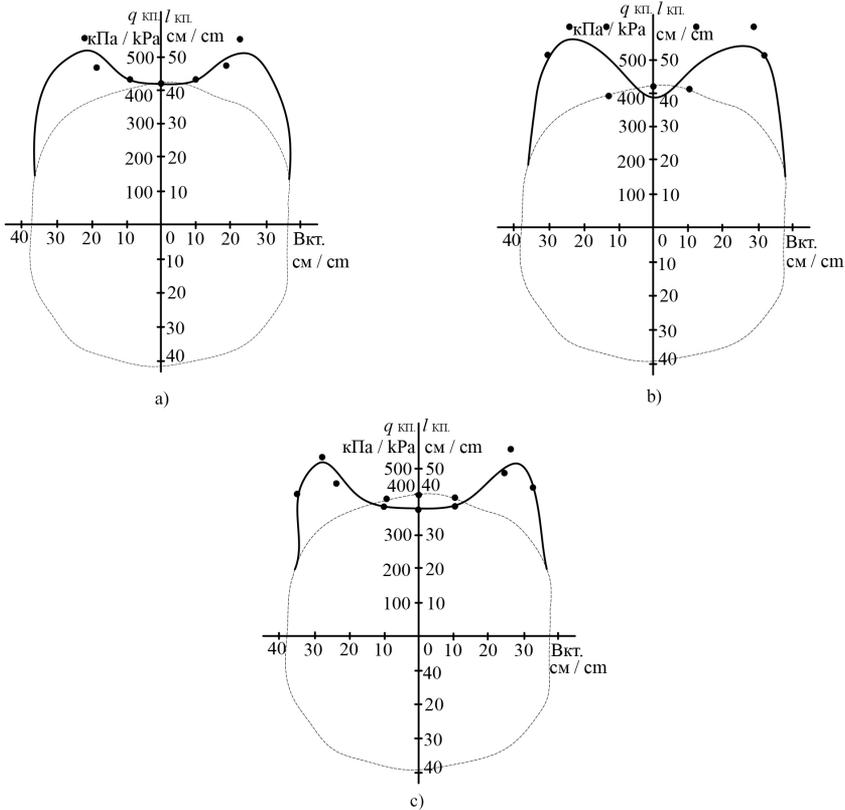
Модель шины / Tire model	Типоразмер шины / Tire size	Нагрузка, Н / Load, N	Площадь контакта, см <sup>2</sup> / Contact area, cm <sup>2</sup>	
			Жесткое опорное основание / Rigid support base	Стерня озимой пшеницы / Stubble of winter wheat
Ф-136 / F-136	30,5L-32	67 445	4 386	4 529
Ф-179 / F-179	30,5L-32	66 610	4 377	4 525
«Good Year»	30,5L-32	66 220	4 385	4 530
Ф-81Э / F-81E	30,5R-32Э / 30,5R-32E	67 200	4 329	4 764
Ф-81DP / F-81DP	30,5DP-32	67 200	4 700	5 300

## Давление в контакте шин с опорным основанием

## The contact pressure of the tires with the support base

Модель шины / Tire model	Типоразмер шины / Tire size	Давление в контакте, кПа / Contact pressure, kPa			
		Среднее по ГОСТ Р 58656-2019 / Average according to GOST R 58656-2019		Максимальное / Maximum	
		Жесткое основание / Rigid base	Стерня озимой пшеницы / Stubble of winter wheat	По ГОСТ Р 58656- 2019 / According to GOST R 58656-2019	Факти- ческое / The actual
Ф-136 / F-136	30,5L-32	153,8	148,9	209,1	177,0
Ф-179 / F-179	30,5L-32	152,2	147,2	207,4	176,9
«Good Year»	30,5L-32	151,0	146,2	205,9	175,6
Ф-81Э / F-81E	30,5R-32Э / 30,5R-32E	155,2	141,1	198,7	157,8
Ф-81DP / F-81DP	30,5DP-32	143,0	126,8	195,0	152,2

Для примера на рисунке 3 приведены контурная площадь контакта и распределение давления по ширине протектора для диагональных шин.



Р и с. 3. Контурная площадь контакта (-----) и распределение давления по ширине протектора диагональных шин (—) движителей комбайнов пятого поколения на стерне озимой пшеницы: а) Ф-136; б) Ф-176; в) «Good year»

Fig. 3. Contour contact area (-----) and pressure distribution over the tread width of diagonal tires (—) of fifth-generation combine harvesters on winter wheat stubble: а) F-136; б) F-176; в) “Good year”

У шин Ф-179 и «Good Year» данные показатели практически одинаковы, но уступают показателям шины Ф-81Э. Существенно выделяется экспериментальная разработка шины диагонально-параллельной конструкции, площадь контакта которой на 17 % больше. Это можно объяснить тем, что экспериментальные шины имеют лучшие деформационные характеристики, чем серийные диагонального и радиального конструктивного исполнения шины с теми же посадочными и габаритными размерами. Такие шины обладают повышенной радиальной деформацией [21].

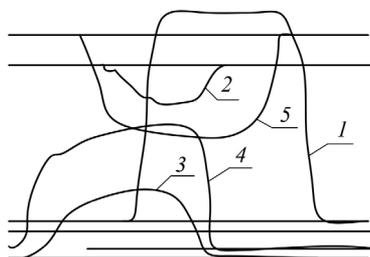
Однако по величине средних и максимальных давлений, вычисленных по методике<sup>18</sup>, в контакте шины Ф-136, Ф-179 и «Good Year» из-за разной нагрузки на них и различной их собственной массы становятся практически равноценными (табл. 4).

<sup>18</sup> ГОСТ Р 58656-2019. Техника сельскохозяйственная мобильная. Методы определения воздействия движителей на почву.

Более того, у шин с малой высотой грунтозацепов и повышенной насыщенностью рисунка протектора («Good Year») значения фактического максимального давления даже меньше.

Следует отметить, что по значениям максимальных давлений, определенных по стандартной методике<sup>19</sup>, на полях с любой влажностью почвы ходовая система зерноуборочного комбайна пятого поколения на различных шинах, за исключением шин Ф-81Э и Ф-81ДП, используемых в засушливый период при влажности почвы не более 0,5 НВ, не соответствует требованиям<sup>20</sup> (не более 80...210 кПа в зависимости от периода года).

При определении действительных максимальных давлений, создаваемых движителями комбайна на стерне озимой пшеницы по специально разработанной методике после обработки осциллограмм было установлено, что эпюра давлений по ширине шины на почву имеет явно выраженный провал в экваториальной зоне (рис. 3), а по длине контакта колеса с агрофоном по форме близко к трапеции (рис. 4).



Р и с. 4. Образец осциллограммы записи сигналов датчиков давлений по длине контакта с агрофоном ведущих колес комбайна на стерне пшеницы:

1, 2, 3, 4, 5 – запись сигналов датчиков давления в соответствии с рисунком 1

F i g. 4. Sample of an oscillogram recording pressure sensor signals along the length of contact of the driving wheels of a combine harvester with the soil on wheat stubble:

1, 2, 3, 4, 5 – recording of pressure sensor signals in accordance with Figure 1

Первое характерно для шин низкого давления [2] и свидетельствует о значительном напряженном состоянии резинокордной оболочки, а второе показывает определенную перегруженность шин.

Наибольшая неравномерность эпюры давления, как продольной, так и поперечной, наблюдается у диагональных шин, а наименьшую неравномерность поперечной эпюры давлений показывают шины 30.5R-32Э и, особенно, 30,5DP-32.

В этом отношении несколько лучше среди диагональных шин выглядит шина «Good Year». Перегруженной следует считать шину Ф-179, у которой неравномерность распределения давления по ширине протектора наибольшая. Нельзя признать нормальным и то, что вследствие повышенного напряженного состояния резинокордной оболочки и неравномерного распределения давления у заднего основания всех грунтозацепов шины Ф-179 вблизи экваториальной зоны образовались

<sup>19</sup> ГОСТ Р 58656-2019. Техника сельскохозяйственная мобильная. Методы определения воздействия движителей на почву.

<sup>20</sup> ГОСТ Р 58655-2019. Техника сельскохозяйственная мобильная. Нормы воздействия движителей на почву.

трещины при ее пробеге всего 25 км. Для устранения этого недостатка требуется технологическая доработка шины.

В результате обработки данных осциллограмм регистрации давлений датчиков, установленных на протекторе испытываемых шин ведущего моста зерноуборочного комбайна пятого поколения, было сделано уточнение, допускаемое стандартами<sup>21</sup>, коэффициентов  $K_1$  и  $K_2$ , используя выражение (1):

$$K_1 = \frac{F_{\text{кп}}}{F_{\text{к}}}, \quad K_2 = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{q_{\text{max}_i}}{q_{\text{cp}_i}} L_i S_i}{\sum_{i=1}^n L_i S_i},$$

В выражении (2)  $F_{\text{кп}}$ ,  $F_{\text{к}}$  – площади контакта шины с агрофоном соответственно фактическая, полученная на основе данных осциллограмм, и установленная по стандартной методике<sup>22</sup>,  $\text{м}^2$ ;  $q_{\text{max}_i}$ ;  $q_{\text{cp}_i}$  – соответственно максимальное и среднее давление на  $i$ -ом участке, кПа;  $L_i$ ;  $S_i$  – соответственно длина и ширина  $i$ -ого участка, м.

По рассчитанным с учетом уточненных значений коэффициентов  $K_1$  и  $K_2$  фактических показателей воздействия на почву сравниваемыми ходовыми системами комбайна (табл. 4) можно обозначить, что по максимальным давлениям в контакте ведущих колес с почвой комбайн пятого поколения выполняет требования ГОСТ Р 58655-2019 на всех сравниваемых шинах (предпочтение следует отдать шинам 30,5DP-32).

В результате обработки осциллограмм с помощью программного обеспечения, имеющегося в персональном компьютере, получены зависимости нормальных напряжений в почве от глубины залегания ее слоев (табл. 5). Они показывают, что величина этих напряжений в почве с низкой влажностью определяется в слоях пахотного (0...30 см) горизонта, в основной массе приходящихся на испытываемое колесо.

Таблица 5

Table 5

**Значения нормальных напряжений в различных слоях агрофона после прохода комбайна**  
**The values of normal stress in soil various layers after the combine harvester has passed**

Модель и типоразмер шины / Tire model and size		Нормальные напряжения по слоям почвы, кПа / Normal stress in soil layers, kPa					
		Глубина измерения, мм / Measuring depth, mm					
		0	100	200	300	400	500
Ф-136 / F-136	30,5L-32	384,9	338,7	217,8	128,2	60,7	20,2
Ф-179 / F-179	30,5L-32	357,2	317,8	222,1	107,6	50,0	19,6
«Good Year»	30,5L-32	360,0	318,1	231,9	103,8	39,3	19,2
Ф-81Э / F-81E	30,5R-32Э / 30,5R-32E	358,3	319,2	221,6	104,3	40,4	18,1
Ф-81DP / F-81DP	30,5DP-32	356,4	317,9	221,2	103,7	38,9	17,7

<sup>21</sup> ГОСТ Р 58655-2019. Техника сельскохозяйственная мобильная. Нормы воздействия движителей на почву; ГОСТ Р 58656-2019. Техника сельскохозяйственная мобильная. Методы определения воздействия движителей на почву.

<sup>22</sup> ГОСТ Р 58656-2019. Техника сельскохозяйственная мобильная. Методы определения воздействия движителей на почву.

Среднее напряжение в пахотном горизонте, создаваемое шинами Ф-179, «Good Year», Ф-81Э и Ф-81DP составляет 214...218 кПа, шиной Ф-136 – около 228 кПа. Здесь уже сказывается влияние высоты грунтозацепов, которая у модели Ф-136 значительно больше.

В подпахотном горизонте разница в величине напряжений, создаваемых шинами, с увеличением глубины залегания слоев почвы уменьшается.

С помощью анализа результатов проведенных экспериментов было доказано, что комплектованием ведущих колес комбайна пятого поколения различными моделями шин существенного преимущества по напряжениям не достигнуто из-за его большой массы.

На глубине 50 см в почве напряжения не превышают 20 кПа, что вполне приемлемо, так как допускаемые значения по ГОСТ Р 58655-2019 составляют 30...35 кПа.

Между тем, расчет этого же напряжения по методике<sup>23</sup> дает величину порядка 81...85 кПа, следовательно, шины требованиям по напряжениям в почве не удовлетворяют.

Такое несоответствие между результатами испытаний и расчетов можно объяснить тем, что стандартная методика, предложенная в ГОСТ 26954-2019, совершенно не учитывает физико-механические свойства почвы и поэтому не является совершенной.

После обработки образцов почвы по общепринятой методике вычислены значения плотности сложения (табл. 6) и наименьшей существенной разницы для нее.

Т а б л и ц а 6

T a b l e 6

**Плотность сложения в слоях почвы по следу движителей**  
**Compaction of the structure of soil layers along the propelling device track**

Глубина слоя, см / Layer depth, cm	Значение показателей плотности сложения почвы в слоях агрофона на стерне озимой пшеницы, г/см <sup>3</sup> / Values of the indicators of the structure compaction of soil layers on the winter wheat stubble, g/cm <sup>3</sup>				
	Ф-136 / F-136 30,5L-32	Ф-179 / F-179 30,5L-32	«Good Year» 30,5L-32	Ф-81Э / F-81E 30,5R-32	Ф-81DP / F-81DP 30,5DP-32
0–10	1,26	1,24	1,25	1,23	1,22
10–20	1,27	1,25	1,25	1,24	1,23
20–30	1,26	1,26	1,26	1,25	1,24
30–40	1,28	1,27	1,27	1,26	1,25
40–50	1,27	1,27	1,27	1,26	1,26

Величина последней при достоверности 0,1 составляет между вариантами шин 0,02...0,03 г/см<sup>3</sup>, между вариантами шин и фоном – 0,03...0,05 г/см<sup>3</sup>. Приведенные в таблице 6 данные показывают, что уплотнение почвы в пахотном горизонте существенно, в подпахотном горизонте несущественно. Несущественна разница в уплотнении между всеми испытываемыми вариантами шин.

<sup>23</sup> ГОСТ 26954-2019. Техника сельскохозяйственная мобильная. Метод определения максимального нормального напряжения в почве.

Здесь можно лишь отметить, что на почве с низкой влажностью наблюдается тенденция к наименьшему уплотняющему воздействию на почву тех шин, на которые приходится меньшая масса («Good Year»), или которые имеют пониженную высоту грунтозацепов (Ф-179, «Good Year»).

Такая тенденция для плотности сложения, характеризующей остаточные процессы в почве при ее уплотнении, согласуется с приведенными ранее данными по максимальным нормальным напряжениям в почве, фиксирующими действие на нее движителя только в процессе контакта.

Таким образом, плотность сложения почвы, изменившаяся под воздействием рассматриваемых вариантов шин зерноуборочных комбайнов пятого поколения, в ее пахотном и подпахотном горизонтах не превышает равновесного для предкавказского легкосуглинистого малогумусного карбонатного чернозема значения.

**Обсуждение и заключение.** Анализ результатов экспериментальных работ по установлению агротехнической проходимости зерноуборочных комбайнов пятого поколения отечественного производства на основе стандартных методик показал, что они на движителях, укомплектованных испытываемыми шинами, по главным показателям (за исключением экспериментальных диагонально-параллельных шин при влажности почвы не более 0,5 НВ) не соответствуют ГОСТ Р 58655-2019.

Опытные диагонально-параллельные шины образуют, в связи с лучшими деформационными свойствами их оболочек, большую площадь пятна контакта с опорным основанием, поэтому значения показателей агротехнической проходимости имеют на 11...28 % меньше [21], чем другие варианты испытываемых шин.

Однако определение значений показателей агротехнической проходимости прямым измерением доказывает возможность применения современных комбайнов отечественного производства на уборке зерновых колосовых при комплектовании их движителей радиальными (с оптимальным армированием внутреннего строения) и опытными диагонально-параллельными шинами, так как:

- значения их максимальных давлений на агрофон меньше на 12...18 % против шин диагонального исполнения за счет образования большей по величине площади контакта при меньшей неравномерности их распределения в продольном и поперечном направлении протектора шины;

- в подпахотных слоях почвы значения напряжений, полученные в результате прямого измерения, постепенно выравниваются, а на глубине 0,50 м по следу всех испытываемых шин становятся не более 20 кПа (допускаемые по ГОСТ Р 58655-2019 – 30...35 кПа);

- величины плотности сложения почвы и возникающих нормальных напряжений в ее пахотных слоях после прохода комбайна на радиальных и диагонально-параллельных шинах меньше на 18 % и более, чем после шин диагонального исполнения, и не превышают равновесного для предкавказского легкосуглинистого малогумусного карбонатного чернозема значения.

Уточнение значений корректировочных коэффициентов  $K_1$  и  $K_2$ , учитывающих типоразмер шин и особенности агрофона, что допускается ГОСТ Р 58655-2019,

показало, что в период уборки зерновых колосовых в условиях Южного федерального округа можно применять отечественные комбайны пятого поколения, укомплектованные любым испытываемым вариантом шин, отдавая предпочтение диагонально-параллельным шинам.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Терновых К.С., Четверова К.С. Состояние и тенденции развития технической базы сельскохозяйственных предприятий. *International Agricultural Journal*. 2022;65(6):1051–1067. [https://doi.org/10.55186/25876740\\_2022\\_6\\_6\\_25](https://doi.org/10.55186/25876740_2022_6_6_25)  
Ternovykh K.S., Chetverova K.S. State and Trends of Development of the Technical Base of Agricultural Enterprises. *International Agricultural Journal*. 2022;65(6):1051–1067. (In Russ., abstract in Eng.) [https://doi.org/10.55186/25876740\\_2022\\_6\\_6\\_25](https://doi.org/10.55186/25876740_2022_6_6_25)
2. Годжаев З.А., Прядкин В.И., Колядин П.А., Артёмов А.В. Перспективные мобильные средства на шинах сверхнизкого давления для сельскохозяйственного производства. *Тракторы и сельхозмашины*. 2022;89(4):277–286. <https://doi.org/10.17816/0321-4443-115016>  
Gojaev Z.A., Pryadkin V.I., Kolyadin P.A., Artemov A.V. Promising Mobile Vehicles with Ultra-Low Pressure Tires for Agricultural Production. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2022;89(4):277–286. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.17816/0321-4443-115016>
3. Moinfar A., Shahgholi G., Abbaspour-Gilandeh Y., Herrera-Miranda I., Hernández-Hernández J.L., Herrera-Miranda M.A. Investigating the Effect of the Tractor Drive System Type on Soil Behavior Under Tractor Tires. *Agronomy*. 2021;11(4):696. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040696>
4. Кононов А.М., Ксеневич И.П. О воздействии ходовых систем тракторных агрегатов на почву. *Тракторы и сельхозмашины*. 1977;(4):5–7. EDN: WGABMX  
Kononov A.M., Ksenevich I.P. [On the Impact of the Running Systems of Tractor Units on the Soil]. *Tractors and Agricultural Machinery*. 1977;(4):5–7. (In Russ.) EDN: WGABMX
5. Годжаев Т.З., Зубина В.А., Малахов И.С. Обоснование функциональных характеристик сельскохозяйственных мобильных энергетических средств в многокритериальной постановке. *Тракторы и сельхозмашины*. 2022;89(6):411–420. <https://doi.org/10.17816/0321-4443-121325>  
Gojaev T.Z., Zubina V.A., Malakhov I.S. The Justification of Functional Properties of Agricultural Moving Power Units in the Multi-Objective Scenario. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2022;89(6):411–420. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.17816/0321-4443-121325>
6. Белоусова Е.Н., Белоусов А.А. Оценка агрофизических свойств чернозема в условиях перехода на почвозащитные технологии обработки. *Агрофизика*. 2021;(3). <https://doi.org/10.25695/AGRPH.2021.03.01>  
Belousova E.N., Belousov A.A. Assessment of Agrophysical Properties of Chernozem in the Conditions of Transition to Soil-Protective Processing Technologies. *Agrophysics*. 2021;(3). (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.25695/AGRPH.2021.03.01>
7. Гармашов В.М., Говоров В.Н., Крячкова М.П. Изменение плотности сложения чернозема обыкновенного при минимизации обработки и прямом посеве в условиях юго-востока ЦЧР. *Аграрная Россия*. 2022;(3). <https://doi.org/10.30906/1999-5636-2022-3-14-17>  
Garmashov V.M., Govorov V.N., Kryachkova M.P. Change in the Density of the Addition of Ordinary Chernozem with Minimization of Processing and Direct Sowing in the Conditions of the South-East of the Central Asian Republic. *Agrarian Russia*. 2022;(3). (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.30906/1999-5636-2022-3-14-17>
8. Ski J.B., Sergiel L. Effect of Wheel Passage Number and Tyre Inflation Pressure on Soil Compaction in the Wheel Track. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW, Agriculture*. 2013:5–15. Available at: <https://clck.ru/3Giiwj> (accessed 23.08.2024).
9. Chervet A., Sturdy W.G., Gut S., Sommer M., Stettler M., Weisskopf P., Keller Th. Wheel Load-Carrying Capacity – a Useful Parameter for Practice. *Swiss Agricultural Research*. 2016. Available at: <https://www.agrarforschungschweiz.ch/en/2016/07/wheel-load-carrying-capacity-a-useful-parameter-for-practice/> (accessed 23.08.2024).
10. Пашковский Р.Р., Евсеев К.Б. Разработка и верификация математической модели взаимодействия колесного движителя с деформируемым грунтом, основанной на применении

- метода дискретных элементов. *Тракторы и сельхозмашины*. 2023;90(2):149–160. <https://doi.org/10.17816/0321-4443-352576>
- Pashkovsky R.R., Evseev K.B. Development and Verification of a Mathematical Model of the Interaction Between a Wheeled Propulsor and Deformable Soil Based on the Application of the Discrete Element Method. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2023;90(2):149–160. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.17816/0321-4443-352576>
11. Шилов И.Н., Романюк Н.Н., Крук И.С., Орда А.Н., Галимов Р.Р., Максимович К.Ю. и др. Влияние параметров ходовых систем колесных машин на изменение плотности почвы. *Тракторы и сельхозмашины*. 2021;88(5):30–37. <https://doi.org/10.31992/0321-4443-2021-5-30-37>  
Shilo I.N., Romanyuk N.N., Kruk I.S., Orda A.N., Galimov R.R., Maximovich K.Yu., et al. The Influence of the Parameters of the Running Systems of Wheeled Vehicles on the Change in Soil Density. *Tractors and Agricultural Machines*. 2021;88(5):30–37. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.31992/0321-4443-2021-5-30-37>
  12. Анисимов Н.Л. Методика рационального выбора комплекта пневматических шин для сельскохозяйственного трактора. *Тракторы и сельхозмашины*. 2022;89(6):421–429. <https://doi.org/10.17816/0321-4443-109895>  
Anisimov N.L. The Method of Reasonable Selection of a Pneumatic Tire Set for an Agricultural Tractor. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2022;89(6):421–429. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.17816/0321-4443-109895>
  13. Moifar A., Shahgholi G., Gilandeha Y.A., Kaveh M., Szymanek M. Investigating the Effect of the Tractor Driving System Type on Soil Compaction Using Different Methods of ANN, ANFIS and Step Wise Regression. *Soil and Tillage Research*. 2022;222:105444. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105444>
  14. Keller T., Sandin M., Colombi T., Horn R., Or D. Historical Increase in Agricultural Machinery Weights Enhanced Soil Stress Levels and Adversely Affected Soil Functioning. *Soil and Tillage Research*. 2019;194:104293. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104293>
  15. Sergiel L., Bulinski J. Soil Compaction Changes in the Area of Wheel Passage at Different Tyre Pressure Values. *Warsaw University of Life Sciences*. 2016;(67):19–28. Available at: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/pdf/10.5555/20163299161> (accessed 27.08.2024).
  16. Mileusnić Z.I., Satjnikov E., Radojević R.L., Petrović D.V. Soil Compaction Due to Agricultural Machinery Impact. *Journal of Terramechanics*. 2022;100:51–60. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2021.12.002>
  17. Яровой В.Г., Кравченко В.А., Меликов И.М., Магомедов Ф.М. Пневматическая шина для мобильного энергетического средства. Патент 2677817 Российская Федерация. 21 января 2019. EDN: **KRAQQZ**  
Yarovoy V.G., Kravchenko V.A., Melikov I.M., Magomedov F.M. Pneumatic Tyre for Mobile Energy Means. Patent 2677817 Russian Federation. 2019 January 21. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **KRAQQZ**
  18. Кравченко В.А., Яровой В.Г., Пархоменко С.Г., Меликов И.М., Яровой А.В. Шинный тестер. Патент 2107275 Российская Федерация. 20 марта 1998. EDN: **BBWPYY**  
Kravchenko V.A., Yarovoy V.G., Parkhomenko S.G., Melikov I.M., Yarovoy A.V. Tire Tester. Patent 2107275 Russian Federation. 1998 March 20. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **BBWPYY**
  19. Kravchenko V., Kravchenko L., Oberemok V., Avanesyan A. Analysis of the Influence of Design Parameters on the Agro-Ecological Qualities of Tractor Tires. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;937:032010. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/937/3/032010>
  20. Кравченко В.А., Меликов И.М. Оценка агротехнических свойств движителей зерноуборочных комбайнов с шинами различного конструктивного исполнения. *Аграрный научный журнал*. 2020;(5):93–98. EDN: **OZXVYR**  
Kravchenko V.A., Melikov I.M. Evaluation of Agrotechnical Properties of Propulsion Units in Combine Harvesters-Threshers with Tires of Various Design. *Agrarian Scientific Journal*. 2020;(5):93–98. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **OZXVYR**
  21. Кравченко В.А., Меликов И.М. Сравнительный анализ деформирования шин 30,5-32 с различным внутренним строением. *Научный журнал КубГАУ*. 2019;(151). <https://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-151-011>

- Kravchenko V.A., Melikov I.M. Comparative Analysis of the Deformation in Tires 30.5-32 with a Different Internal Structure. *Scientific Journal of KubSAU*. 2019;(151). (In Russ., abstract in Eng.) <https://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-151-011>
22. Скорляков В.И., Ревенко В.Ю. Особенности воздействия на почву зерноуборочных комбайнов. *Техника и оборудование для села*. 2022;(1):25–29. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2022-1-25-29>  
Skorlyakov V.I., Revenko V.Yu. Features of the Impact on the Soil of Combine Harvesters. *Machinery and Equipment for the Village*. 2022;(1):25–29. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2022-1-25-29>
23. Скорляков В.И., Ревенко В.Ю. Совершенствование метода расчета давления движителей зерноуборочных комбайнов на почву. *Тракторы и сельхозмашины*. 2022;89(6):403–410. <https://doi.org/10.17816/0321-4443-108481>  
Skorlyakov V.I., Revenko V.Yu. Improvement of the Method of Calculation of Pressure of Combine Harvester Propulsion on Soil. *Tractors and Agricultural Machines*. 2022;89(6):403–410. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.17816/0321-4443-108481>
24. Драгуленко В.В., Харитонов В.В. Динамика качения колеса с пневматической шиной при переменной вертикальной нагрузке. *Научный журнал КубГАУ*. 2024;198:79–88. EDN: QLPNHQ  
Dragulenko V.V., Kharitonov V.V. Rolling Dynamics of a Pneumatic Tire Wheel Under Variable Vertical Load. *Scientific Journal of KubGAU*. 2024;198:79–88. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: QLPNHQ
25. Кравченко В.А., Кравченко Л.В., Меликов И.М., Кондра Б.А. Оценка показателей агропроходимости мощных зерноуборочных комбайнов в комплектации с шинами различного исполнения. *Вестник аграрной науки Дона*. 2020;50(2):34–43. EDN: TWIUJF  
Kravchenko V.A., Kravchenko L.V., Melikov I.M., Kondra B.A. Estimation of Agro Cross-Country Ability Indicators of Powerful Grain Harvesters Completed with Tires of Various Designs. *Don Agrarian Science Bulletin*. 2020;50(2):34–43. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: TWIUJF
26. Липкань А.В., Панасюк А.Н., Годжаев З.А., Лавров А.В., Русанов А.В., Казакова В.А. Оценка способов экспериментально-аналитического определения контурной площади пятна контакта пневмошины с опорным основанием. *Тракторы и сельхозмашины*. 2021;88(1):40–50. <https://doi.org/10.31992/0321-4443-2021-1-40-50>  
Lipkan A.V., Panasyuk A.N., Gojaev Z.A., Lavrov A.V., Rusanov A.V., Kazakova V.A. Evaluation of Methods for Experimental and Analytical Determination of the Contour Area of the Contact Patch of a Pneumatic Tire with a Support Base. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2021;88(1):40–50. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.31992/0321-4443-2021-1-40-50>

Об авторах:

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

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

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

**Меликов Изет Мелукович**, кандидат технических наук, доцент кафедры технической эксплуатации автомобилей Дагестанского государственного аграрного университета имени М. М. Джембулатова (367032, Российская Федерация, г. Махачкала, ул. Магомета Гаджиева, 180), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8928-8714>, Scopus ID: 57211759742, SPIN-код: 3194-9952, izmelikov@yandex.ru

*Заявленный вклад авторов:*

Л. В. Кравченко – контроль, лидерство и наставничество в процессе планирования и проведения исследования; формулирование замысла исследования, целей и задач; осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов или сбор данных; создание и подготовка рукописи: написание черновика рукописи, включая его перевод на иностранный язык.

В. А. Кравченко – применение статистических, математических, вычислительных других формальных методов для анализа данных исследования; разработка или проектирование методологии исследования; создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования и полученных данных.

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

И. М. Меликов – 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 17.10.2024; поступила после рецензирования 04.11.2024; принята к публикации 12.11.2024*

*About the authors:*

**Lyudmila V. Kravchenko**, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Design and Technical Service of Transport and Technological Systems, Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344003, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9228-3313>, Researcher ID: ABD-9790-2021, Scopus ID: 57204646125, SPIN-code: 9684-8955, Lyudmila.vl.kravchenko@yandex.ru

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

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

**Izzet M. Melikov**, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Technical Operation of Automobiles, Dagestan State Agricultural University named after M. M. Dzhambulatov (180 Magomed Gadzhiev St., Makhachkala 367032, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8928-8714>, Scopus ID: 57211759742, SPIN-code: 3194-9952, izmelikov@yandex.ru

*Contribution of the authors:*

L. V. Kravchenko – control, leadership and mentoring in the process of planning and conducting the study; formulating the idea, aims and objectives of the study; conducting the study including performing experiments and collecting data; preparing the manuscript.

V. A. Kravchenko – using statistical, mathematical, computational, or other formal techniques to analyze the study data; developing or designing the study methodology; preparing, the manuscript; visualizing the study results and data obtained.

V. V. Zhurba – conducting the study, including performing the experiments and collecting data; preparing, the manuscript; visualizing the study results and data obtained.

I. M. Melikov – conducting the study, including performing the experiments and collecting data; preparing, the manuscript; visualizing the study results and data obtained.

*All authors have read and approved the final manuscript.*

*Submitted 17.10.2024; revised 04.11.2024; accepted 12.11.2024*

**ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ /  
TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT**<https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202501.121-138>EDN: <https://elibrary.ru/owtife>

УДК 621.927

ISSN Print 2658-4123

ISSN Online 2658-6525

<https://vestnik.mrsu.ru>*Оригинальная статья / Original article***Оптимизация параметров универсальной  
установки для измельчения кормов****З. В. Кулиев** , **К. Г. Якубов**, **Э. М. Алиев***Азербайджанский государственный аграрный университет  
(г. Гянджа, Азербайджан)*✉ [vaqifizz@gmail.com](mailto:vaqifizz@gmail.com)**Аннотация**

*Введение.* Разнообразие кормовой базы и поголовья скота в фермерских хозяйствах требует множества различных технологических линий и технических средств для приготовления кормов. Чаще всего такие технические средства имеют высокую стоимость, что делает их использование экономически нецелесообразным. Таким образом, создание малогабаритных технических средств для механизации основных процессов кормоприготовления в фермерских хозяйствах является актуальной задачей.

*Цель исследования.* Изучить основные конструктивно-технологические факторы, влияющие на рабочий процесс измельчения кормов молотково-сегментным режущим рабочим органом с более эффективными показателями энергоёмкости процесса.

*Материалы и методы.* Объектом исследования является экспериментальная установка универсального измельчителя с комбинированным молотково-сегментным режущим рабочим органом. В ходе исследования были установлены критерии оптимизации и определены ключевые факторы, влияющие на процесс измельчения. Исследовалось влияние ключевых факторов частоты вращения ротора и подачи сырья в измельчающую камеру на критерии оптимизации энергопотребления и качество процесса измельчения. В процессе экспериментов частота вращения ротора регулировалась изменением частоты питающего напряжения, подача сырья определенной массы проводилась через каждый определенный промежуток времени, качество измельчения определялось гранулометрическим составом и средневзвешенной длиной частиц кормов. Энергоёмкость процесса измельчения установили с помощью измерителя мощности переменного тока. С целью построения математической модели был использован центральный композиционный рототабельный план второго порядка для двух факторов.

*Результаты исследования.* Выявили оптимальные сочетания параметров, которые позволяют эффективно измельчать корм в соответствии с зоотехническими требованиями, обеспечивая минимальную энергоёмкость рабочего процесса. Установили критерии оптимизации и определили ключевые конструктивно-технологические факторы, влияющие на процесс измельчения.

*Обсуждение и заключение.* Основным фактором воздействия на энергоёмкость процесса измельчения является подача кормов в камеру измельчения, а основная причина увеличения энергоёмкости процесса – рост силы резания в каждом сегменте рабочего органа в отдельности, вследствие повышения за каждую единицу времени плотности корма, проходящего через рабочий орган измельчителя. Полученные в ходе экспериментальных исследований данные позволяют оптимизировать рабочий процесс разработанной универсальной установки для измельчения кормов при кормлении крупного рогатого скота в фермерских животноводческих хозяйствах.

© Кулиев З. В., Якубов К. Г., Алиев Э. М., 2025

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

**Ключевые слова:** грубые корма, зерновые корма, корнеклубнеплоды, процесс измельчения, энергемкость процесса, камера измельчения, измельчающий орган

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Кулиев З.В., Якубов К.Г., Алиев Э.М. Оптимизация параметров универсальной установки для измельчения кормов. *Инженерные технологии и системы*. 2025;35(1):121–138. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202501.121-138>

## Optimizing the Parameters of a Universal Unit for Fodder Grinding

Z. V. Quliyev , K. G. Yaqubov, E. M. Aliev  
Azerbaijan State Agrarian University  
(Ganja, Azerbaijan)  
 [vaqifizz@gmail.com](mailto:vaqifizz@gmail.com)

### Abstract

**Introduction.** The diversity of the fodder base and livestock in farming enterprises requires various processing lines and technological tools for fodder preparation. Most commonly, a high cost of these technological tools makes their use economically unfeasible. Therefore, an urgent task is to create compact technological tools for mechanizing the main processes of fodder preparation in farming enterprises.

**Aim of the Study.** The study is aimed at investigating the main structural-and-technological factors affecting the fodder grinding by a hammer-segment grinding tool with more efficient energy consumption indicators.

**Materials and Methods.** The subject of the study is an experimental setup of a universal grinder with a combined hammer-segment grinding tool. During the study, optimization criteria were found and key factors influencing the grinding process were identified. There was investigated the influence of key factors, such as the rotor rotation speed and the rate of raw material feeding into the grinding chamber, on such optimization criteria as energy consumption and grinding process quality. The experimental studies were analyzed to determine the optimal combination of parameters. During the experiments, the rotor rotation speed was adjusted through changing the supply voltage frequency and the feeding of raw material of a specific mass was carried out at regular intervals. The quality of grinding was determined by the granulometric composition and the average length of the fodder particles, while the energy consumption of the grinding process was measured using an alternating current power meter. To construct a mathematical model, there was used a central composite rotatable design of the second order for two factors.

**Results.** Based on the obtained data, there have been identified optimal parameter combinations for effective fodder grinding in accordance with zootechnical requirements and at minimal energy consumption for the grinding process.

**Discussion and Conclusion.** The main factor affecting the energy consumption of the grinding process is the fodder supply into the grinding chamber. The primary reason for the increase in energy consumption is the increase in grinding force in each segment of the working tool caused by increasing the density of fodder passing through the grinding tool per each unit of time. The data obtained during the experimental study make it possible to optimize the working process of the developed universal grinder for fodder grinding to feed cattle in livestock farms.

**Keywords:** coarse feeds, grain feeds, root and tuber crops, grinding process, energy consumption of the process, grinding chamber, grinding tool

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

**For citation:** Quliyev Z.V., Yaqubov K.G., Aliev E.M. Optimizing the Parameters of a Universal Unit for Fodder Grinding. *Engineering Technologies and Systems*. 2025;35(1):121–138. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202501.121-138>

**Введение.** Эффективное и высокопроизводительное развитие животноводства зависит от полноценного и сбалансированного питания животных. Употребление животными кормов, богатых питательными веществами, улучшает процессы пищеварения и способствует увеличению продуктивности, позволяет достичь оптимальных результатов без увеличения кормовой базы и поголовья скота. Например, при таком подходе наблюдается повышение удоя молока на 5–9 % и прирост массы на 10–15 %, по сравнению с отдельным кормлением компонентами рациона<sup>1</sup>.

Для увеличения продуктивности сельскохозяйственных животных необходимо, чтобы корма проходили качественную подготовку перед скармливанием. Корм должен быть тщательно сбалансирован по питательным веществам и измельчен в целях увеличения поверхностно активных частиц для того, чтобы полностью усваиваться организмом животных. В зависимости от назначения и условий содержания животных для выращивания и откорма молодняка используются различные виды кормов. В соответствии с технологией кормления животных в состав рационов включаются различные кормовые элементы. От качества подготовки кормовых смесей в значительной степени зависит повышение эффективности животноводства как отрасли, поскольку доля затрат на корма составляет 30–60 % от всех производственных затрат<sup>2</sup> [1].

Современный уровень развития крестьянских и фермерских хозяйств наряду с механизацией процесса приготовления кормовых смесей усложняют создание кормов благодаря большому количеству компонентов в их составе. Это приводит к значительному увеличению себестоимости как самих смесей, так и конечной продукции животноводства [2; 3]. Решением данной проблемы является минимизация количества компонентов в кормовых смесях за счет включения только богатых питательными веществами при соблюдении оптимальных пропорций [4–6].

Особенностью малых и средних фермерских хозяйств является необходимость работы с разнообразной кормовой базой, включающей различные виды кормовых культур, а также содержание разных видов сельскохозяйственных животных. Это требует применения множества специализированных технологических линий и технических средств для обработки и приготовления кормов. Однако высокая стоимость такого оборудования, а также значительные эксплуатационные и энергетические затраты делают его использование экономически нецелесообразным для небольших хозяйств [7; 8]. В связи с этим актуальной задачей становится разработка и внедрение малогабаритных и многофункциональных технических решений, способных механизировать основные процессы кормоприготовления (измельчение, смешивание, дозирование, гранулирование) [9–11].

Такие устройства должны быть адаптированы к специфике кормовой базы малых и средних фермерских хозяйств, обеспечивать высокое качество обработки кормов

<sup>1</sup> Рядчиков В. Г. Основы питания и кормления сельскохозяйственных животных : учебно-практическое пособие. Краснодар : КубГАУ, 2012. 328 с.; Калашников А. П. Нормы и рационы кормления сельскохозяйственных животных : справочное пособие. 3-е изд., перераб. и доп. / под ред. А. П. Калашникова, В. И. Фисинина, В. В. Щеглова, Н. И. Клейменова. М. 2003. 456 с.

<sup>2</sup> Kravchuk V. I., Lutsenko M. M., Mechta M. P. Progressive Technologies of Gathering, Preparing and Distributing Feeds. Scientific-Practical Textbook, 2008. 104 p.; Adgidzi D., Mu'azu A., Olorunso S. T., Shiwoya E. L. Design Considerations of Mixerpelleting Machine for Processing Animal Feeds // School of Engineering and Engineering Technology : 7<sup>th</sup> Annual Engineering Conference (28 – 30 June 2006, Minna). FUT Minna, 2006.

и при этом быть экономически выгодными за счет снижения энергозатрат и минимизации использования ресурсов [12]. Разработка подобных технологий должна учитывать не только экономические, но и экологические аспекты, способствуя устойчивому развитию сельского хозяйства и снижению углеродного следа [13].

Важным направлением является создание универсальных устройств, которые могут выполнять несколько функций одновременно, что позволит сократить количество необходимого оборудования, снизить затраты на его приобретение и обслуживание, а также повысить эффективность производства кормов [14]. Кроме того, такие технические средства должны быть просты в эксплуатации и доступны для фермеров с ограниченными техническими знаниями, что особенно важно в условиях малых хозяйств [15].

Внедрение подобных решений не только повысит рентабельность фермерских хозяйств, но будет способствовать улучшению качества кормов, что напрямую повлияет на продуктивность животных и, как следствие, на экономическую устойчивость сельскохозяйственных предприятий [16].

Цель исследования – определить и оптимизировать наиболее значимые факторы измельчения зерновых, грубых кормов, а также корнеклубнеплодов с комбинированным молотково-сегментным режущим рабочим органом с целью поиска оптимальных сочетаний параметров, при которых будут готовиться корма более высокого качества и при этом с минимальным энергопотреблением.

**Обзор литературы.** Анализ существующих технических средств для механизации основных процессов кормоприготовления выявил проблемы, связанные с организационными, техническими и технологическими недостатками, которые приводят к низкой эффективности использования более металлоемких серийно выпускаемых машин. Это создает неблагоприятные условия для применения их в малых фермерских хозяйствах. Для устранения этих проблем и усовершенствования процесса приготовления кормов проводятся работы по созданию и разработке конструкций установок для измельчения кормов для малых и средних фермерских хозяйств.

С целью изучения процесса измельчения кормов растительного происхождения в Ульяновском государственном аграрном университете была разработана установка для измельчения различных видов кормов, основанная на принципе ударного механизма, обеспечивающая широкий диапазон скоростей резания. Для обеспечения необходимого угла скольжения режущий элемент (нож) оснащен регулируемой пластиной с фиксатором, что позволяет изменять угол скольжения в пределах от 0 до 70°. Было установлено, что при угле скольжения ножа в пределах 30–60° и скорости в пределах 2–10 м/с возможно снизить удельную работу измельчения кукурузных початков и стеблей, картофеля, кормовой свеклы и моркови на 25–37 %, кукурузных листьев – на 15 %, пшеничной соломы – на 3 % [17].

В Самарской государственной сельскохозяйственной академии разработан и изготовлен шнековый измельчитель, в котором гребни шнека разделены на несколько частей<sup>3</sup>. Каждая часть выполняет функции резания и перемещения перерабатываемого продукта. Для достижения степени измельчения 10–15 мм при производительности

<sup>3</sup> Новиков В. В., Камышева О. А. Технология измельчения корнеклубнеплодов // *Фундаментальные основы научно-технической и технологической модернизации АПК : материалы Всерос. науч.-практ. конф. (6 – 7 июня 2013 г., г. Уфа)*. Ч. 1. Уфа : Башкирский ГАУ, 2013. С. 247–253. URL: <https://clck.ru/3Gbepr> (дата обращения: 27.08.2024).

установки 1 341–2 537 кг/ч и оптимальной энергоемкости процесса 2,152–5,574 кВт были определены следующие оптимальные параметры: частота вращения ножевого вала – 30,0...61,4 мин<sup>-1</sup>; шаг расположения ножей на ножевом валу – 120 мм; степень открытия выходного отверстия – 0,4...1,0; угол при вершине ножа – 30° [18; 19].

Для устранения таких недостатков, как высокая металлоемкость и энергоемкость, неравномерный размер частиц измельченного продукта, быстрое изнашивание рабочих органов и т. д., разработана конструкция роторно-центробежного измельчителя зерна. Основными рабочими органами установки являются коаксиально установленные два смежных диска: верхний неподвижный диск, на рабочей поверхности которого установлены ножи ромбовидной формы с малыми углами резания по отношению к большим диагоналям, и нижний подвижный диск с кольцевыми выступами на рабочей поверхности. Внешний ряд ножей образует разделяющую поверхность, благодаря чему изменение угла наклона ножей позволяет плавно регулировать степень измельчения материала. Для достижения процента частиц, не превышающих 3 мм, до 95 % и снижения потребляемой энергии до 2,59 кВт были определены оптимальные параметры, которые указаны в таблице 1 [20].

Т а б л и ц а 1

T a b l e 1

**Оптимальные конструктивно-режимные параметры**  
**Optimal design and operating parameters**

Наименование параметра / Name of the parameter	Значение / Meaning
Скорость подачи материала, кг·с <sup>-1</sup> / Material feed rate, kg·s <sup>-1</sup>	0,038
Частота вращения нижнего диска, мин <sup>-1</sup> / Lower disk rotation frequency, min <sup>-1</sup>	1 200
Отверстие разделительной поверхности, мм / Dividing surface opening, mm	3,200
Количество ножей на первой ступени верхнего диска / Number of knives on the first stage of the upper disk	6
Количество ножей на второй ступени верхнего диска / Number of knives on the second stage of the upper disk	9

По результатам экспериментов установлено, что количество ножей и зазор, разделяющий поверхности, являются одними из самых важных факторов, влияющих на энергопотребление и качество получаемого продукта.

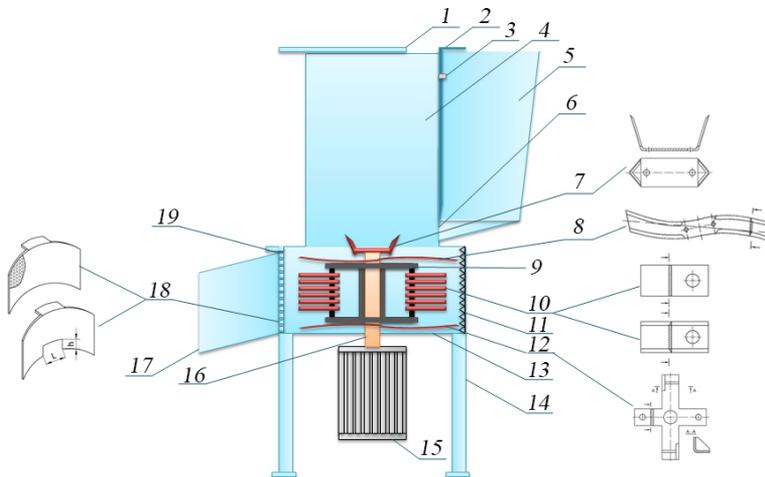
В Верхневолжском государственном агробиотехнологическом университете разработан центробежный измельчитель фуражного зерна, состоящий из корпуса рабочей камеры, бункера с регулировочной заслонкой, ротора с лопатками, решета и деки с отбойниками. С целью определения оптимальных параметров установки для повышения качества размола и снижения энергоемкости процесса проведены экспериментальные исследования. По результатам экспериментальных данных получены различные значения удельного расхода при следующих параметрах решет с отверстиями ( $d$ ), площади выпускного окна бункера ( $F$ ) и частоте вращения ротора ( $n$ ):  $W = 31,687$  кДж/кг;  $d = 0,004$  м;  $n = 3\ 500$  мин<sup>-1</sup>;  $F = 0,001458$  м<sup>2</sup>;  $W = 14,432$  кДж/кг;  $d = 0,006$  м;  $n = 3\ 500$  мин<sup>-1</sup>;  $F = 0,001458$  м<sup>2</sup>;  $W = 12,201$  кДж/кг;  $d = 0,008$  м;  $n = 3\ 500$  мин<sup>-1</sup>;  $F = 0,001458$  м<sup>2</sup>.

Наилучшие значения удельного расхода энергии получены при максимальных значениях всех трех параметров, то есть в третьем случае. При этом средний размер частиц составил  $d_{cp} = 2,42$  мм, а содержание пылевидной фракции 3,02 % [21; 22].

Таким образом, совершенствование установок механической обработки кормов является актуальной задачей. Решение данной проблемы способствует как повышению усвоения кормов животными, так и улучшению качества продукции животноводства. Также более совершенные конструкции способствуют снижению энергозатрат на производство, что отражается на себестоимости продукта.

В качестве решения проблемы мы предлагаем конструктивно-технологическую схему универсального измельчителя с комбинированным молотково-сегментным режущим рабочим органом для измельчения, дробления и резки стебельчатых, зерновых и корнеклубнеплодных кормов [23].

**Материалы и методы.** Исследования проводились на разработанной нами экспериментальной установке универсального измельчителя кормов с комбинированным молотково-сегментным режущим рабочим органом, конструктивно-технологическая схема которой приведена на рисунке 1 [23].



Р и с. 1. Универсальный измельчитель кормов:

- 1 – крышка; 2 – регулировочный затвор; 3 – болт сжатия; 4 – цилиндрический бункер;  
 5 – конический бункер; 6 – проходное отверстие; 7 – сегментный U-образный нож;  
 8 – двухсторонний нож пропеллерного типа; 9 – ротор; 10 – набор подвижных молотков и ножей;  
 11 – дека; 12 – пластина, являющаяся одновременно вентилятором и измельчителем, имеющая  
 ответвление в виде лопастей с косынкой на краях для обеспечения прочности;  
 13 – камера измельчения; 14 – рама; 15 – электрический двигатель; 16 – вал;  
 17 – выходной патрубок; 18 – набор сеток и пластина с окнами; 19 – выходное отверстие

F i g. 1. Universal feed grinder:

- 1 – lid; 2 – adjustment gate; 3 – compression bolt; 4 – cylindrical hopper;  
 5 – conical hopper;  
 6 – passage hole; 7 – segmental U-shaped knife; 8 – double-sided propeller-type knife;  
 9 – rotor; 10 – set of movable hammers and knives; 11 – breaker plate; 12 – plate, which also serves as  
 a fan and grinder, with blade extensions reinforced with gussets for strength;  
 13 – grinding chamber; 14 – frame; 15 – electric motor; 16 – shaft; 17 – output pipe;  
 18 – set of sieves and plate with windows; 19 – discharge outlet

*Источник:* здесь и далее рисунки составлены авторами статьи.

*Source:* hereinafter in this article the diagrams are compiled by the authors.

Измельчающий механизм данного устройства включает в себя ротор 9, на котором расположены набор подвижных молотков и режущих ножей 10, двухсторонний пропеллерный нож 8, сегментный U-образный нож 7, а также пластину 12, выполняющую функции вентилятора и измельчителя.

Корма предварительно измельчаются двухсторонним ножом 8, затем они подходят к верхнему ряду набора подвижных молотков и режущих ножей 10, после удара о которые отбрасываются к расположенной на внутренней боковой поверхности рабочей камеры 13 деке 11 и перенаправляются к подвижным молоткам и режущим ножам следующего ряда, при этом корм разгружается от повторного воздействия на верхнем ряде. Таким образом, происходит полное измельчение во всех рядах набора молотков и режущих ножей. При измельчении тлюков происходит предварительное разрушение монолита и измельчение с целью исключения забиваний сегментным U-образным ножом 7. Измельченный корм поступает на пластину 12, выполняющую функции вентилятора и измельчителя, где после окончательного измельчения удаляется из устройства воздушным потоком.

В процессе эксперимента производилось измельчение зерновых (кукурузы с влажностью 8, 6 %, ячменя с влажностью 10, 1 %, пшеницы с влажностью 9, 7 %), грубых кормов (сено с влажностью 16 % и солома с влажностью 14 %), а также корнеклубнеплодов (кормовой свеклы с влажностью 86, 5 %, картофеля с влажностью 76, 8 % и моркови с влажностью 87 %). Размеры частиц измельченных масс соответствовали зоотехническим требованиям. Этот показатель составлял для грубых кормов 10...50 мм, для кормовой свеклы – 5,5...9,5 мм, для картофеля – 11,5...14,3 мм, для моркови – 5...10 мм, для зерновых – 1,0...2,0 мм. В общей массе влажность измельченных зерновых: кукурузы – 93, 5 %, ячменя – 98, 1 %, пшеницы – 98, 4 %.

Эксперименты и обработка данных проводились на основании общепринятых методик и методов<sup>4</sup>.

**Результаты исследования.** *Влияние факторов на энергоемкость процесса и определение их оптимальных показателей.* В качестве критерия оптимизации была принята удельная энергоемкость процесса измельчения кормов ( $Y_N - N$ ), вы-

раженная в  $\frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т}}$ . Анализ априорной информации и поисковых исследований показал, что наиболее значимыми явились следующие факторы: угловая скорость вращения ротора  $\omega - X_1$  (рад/с) и подача корма в камеру измельчения  $q - X_2$  (кг/с). Уровни варьирования факторов приведены в таблице 2.

Результаты эксперимента представлены в таблице 3: проведена обработка данных и построены математические модели.

<sup>4</sup> Маслов Г. Г., Трубилин Е. И., Цыбулевский В. В. Моделирование в агроинженерии : учебное пособие для сельскохозяйственных ВУЗов. Краснодар : КубГАУ, 2019. 304 с. URL: <https://clck.ru/3GbefR> (дата обращения: 27.08.2024); Реброва И. А. Теория планирования эксперимента : учебное пособие. Омск : СибАДИ, 2016. 105 с.; ГОСТ Р 54783-2011. Испытания сельскохозяйственной техники. Основные положения [Электронный ресурс]. URL: <https://clck.ru/3GbekT> (дата обращения: 27.08.2024).

Таблица 2

Table 2

**Факторы и уровни их варьирования**  
**Factors and their levels of variation**

Обозначение / Designation	$(\omega - X_1)$ , рад/с / rad/s	$(q - X_2)$ , кг/с / kg/s		
		$x_{2r}$	$x_{2s}$	$x_{2k}$
Нижний уровень (-) / Lower level (-)	169,6	0,05	0,075	0,100
Основной уровень (0) / Main level (0)	222,6	0,06	0,100	0,125
Верхний уровень (+) / Upper level (+)	275,6	0,07	0,125	0,150
Уровни вариации / Levels of variation	53	0,01	0,025	0,025

Таблица 3

Table 3

**Матрица плана эксперимента**  
**The matrix of the experiment plan**

№	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_1x_2$	$x_1^2$	$x_2^2$	$Y_N$		
							$Y_{N_r}$	$Y_{N_s}$	$Y_{N_k}$
1	+	+	+	+	+	+	1,53	1,67	1,81
2	+	-	+	-	+	+	1,37	1,53	1,72
3	+	+	-	-	+	+	1,39	1,68	1,79
4	+	-	-	+	+	+	1,45	1,42	1,68
5	+	+1,414	0	0	+2	0	1,37	1,45	1,78
6	+	-1,414	0	0	+2	0	1,39	1,54	1,75
7	+	0	+1,414	0	0	+2	1,35	1,68	1,68
8	+	0	-1,414	0	0	+2	1,22	1,63	1,66
9	+	0	0	0	0	0	1,12	1,39	1,67
10	+	0	0	0	0	0	1,10	1,38	1,63
11	+	0	0	0	0	0	1,14	1,36	1,64
12	+	0	0	0	0	0	1,13	1,42	1,65
13	+	0	0	0	0	0	1,13	1,40	1,62
$\sum 13$							$\sum 16,69$	$\sum 19,55$	$\sum 22,08$

С целью обоснования оценки влияния факторов по результатам эксперимента рассчитаны уравнения регрессии второго порядка:

$$1) \text{ для энергоёмкости процесса измельчения грубых кормов } (N - Y_{N_r}), \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{Т}} : \\ y_{N_r} = 1,124 + 0,08965x_1 + 0,0305x_2 + 0,055x_1x_2 + 0,154x_1^2 + 0,106x_2^2; \quad (1)$$

$$2) \text{ для энергоёмкости процесса измельчения зерновых кормов } (N - Y_{N_s}), \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{Т}} : \\ y_{N_s} = 1,389 + 0,0341x_1 + 0,0213x_2 + 0,03x_1x_2 + 0,0575x_1^2 + 0,137x_2^2; \quad (2)$$

3) для энергоемкости процесса измельчения корнеклубнеплодов ( $N - Y_{N_k}$ ),  $\frac{\text{кВт}\cdot\text{ч}}{\text{т}}$ :

$$y_{N_k} = 1,642 + 0,0303x_1 + 0,011x_2 + 0,005x_1x_2 + 0,0696x_1^2 + 0,0221x_2^2. \quad (3)$$

Значимость полученных результатов проверена по критерию Кохрена, а гипотезу адекватности проверяли с помощью критерия Фишера:

$$G_{pr} = 0,61 < G_T = 0,7679; G_{p_3} = 0,59 < G_T = 0,7679; G_{pk} = 0,59 < G_T = 0,7679;$$

$$F_{pr} = 8,002 < F_T = 18,51; F_{p_3} = 7,991 < F_T = 18,51; F_{p_3} = 8 < F_T = 18,51.$$

После получения адекватных математических моделей процесса определялись координаты оптимума и изучались поверхности отклика.

Получены оптимальные значения факторов, при которых минимальное значение энергоемкости процесса измельчения составило для грубых кормов

$y_{N_r} = 1,110, \frac{\text{кВт}\cdot\text{ч}}{\text{т}}$ , для зерновых кормов  $-y_{N_3} = 1,382, \frac{\text{кВт}\cdot\text{ч}}{\text{т}}$ , для корнеклубнеплодов  $-y_{N_k} = 1,634, \frac{\text{кВт}\cdot\text{ч}}{\text{т}}$ . Оптимальные значения факторов приведены в таблице 4.

Т а б л и ц а 4

T a b l e 4

#### Оптимальные значения факторов Optimal values of the factors

Виды кормов / Types of feed	Значение факторов / Importance of factors			
	$\omega - X_1, \text{ рад/с} / \text{ rad/s}$		$q - X_2, \text{ кг/с} / \text{ kg/s}$	
	Кодированное / Coded	Раскодированное / Decoded	Кодированное / Coded	Раскодированное / Decoded
Грубые корма / Coarse feeds	-0,278	$\omega = 207,87$	-0,0717	$q = 0,0593$
Зернистые корма / Granular feeds	-0,326	$\omega = 205,32$	-0,1130	$q = 0,0972$
Корнеклубнеплоды / Root and tuber crops	-0,227	$\omega = 210,57$	-0,2750	$q = 0,1180$

После получения соответствующей математической модели второго порядка и определения оптимальных координат центра отклика поверхности мы изучаем характеристики этой поверхности по ее окружности. Для этого переносим начало системы координат в центр фигуры системы координат  $x_1 - x_2$ . Перенос координатной системы параллельно центру фигуры приводит к исчезновению линейных членов в уравнениях (1)–(3), в это время коэффициенты других членов остаются неизменными, а показатели свободных переменных изменяются. В результате эти уравнения принимают следующий вид:

1) для энергоемкости процесса измельчения грубых кормов ( $N - Y_{N_r}$ ),  $\frac{\text{кВт}\cdot\text{ч}}{\text{т}}$  :

$$y_{N_r} = 1,110 + 0,055x_1x_2 + 0,154x_1^2 + 0,106x_2^2; \quad (4)$$

2) для энергоемкости процесса измельчения зерновых кормов ( $N - Y_{N_3}$ ),  $\frac{\text{кВт}\cdot\text{ч}}{\text{т}}$  :

$$y_{N_3} = 1,382 - 0,03x_1x_2 + 0,575x_1^2 + 0,137x_2^2; \quad (5)$$

3) для энергоемкости процесса измельчения корнеклубнеплодов ( $N - Y_{N_k}$ ),  $\frac{\text{кВт}\cdot\text{ч}}{\text{т}}$  :

$$y_{N_k} = 1,634 - 0,005x_1x_2 + 0,0696x_1^2 + 0,0221x_2^2. \quad (6)$$

Чтобы исключить парное взаимодействие между факторами, начало системы координат перемещается в одну точку, в которой определяются угол поворота оси координат и коэффициенты регрессии в канонической форме. После этого уравнения (4)–(6) приводятся к канонической форме:

1) для энергоемкости процесса измельчения грубых кормов ( $N - Y_{N_f}$ ),  $\frac{\text{кВт}\cdot\text{ч}}{\text{т}}$  :

$$\alpha = 24^\circ 27'$$
$$Y - 1,110 = 0,099X_1^2 + 0,161X_2^2; \quad (7)$$

2) для энергоемкости процесса измельчения зерновых кормов ( $N - Y_{N_3}$ ),  $\frac{\text{кВт}\cdot\text{ч}}{\text{т}}$  :

$$\alpha = 10^\circ 21'$$
$$Y - 1,382 = 0,0821X_1^2 + 0,112X_2^2; \quad (8)$$

3) для энергоемкости процесса измельчения корнеклубнеплодов ( $N - Y_{N_k}$ ),  $\frac{\text{кВт}\cdot\text{ч}}{\text{т}}$  :

$$\alpha = -3^\circ$$
$$Y - 1,634 = 0,0679X_1^2 + 0,0237X_2^2. \quad (9)$$

Поскольку в уравнениях (7)–(9) коэффициенты при неизвестных членах имеют одинаковый знак, то они характеризуются как уравнения эллипса. При оптимальном влиянии факторов на процесс были построены поверхности откликов ( $Y_{N_f}$ ), ( $Y_{N_3}$ ), ( $Y_{N_k}$ ) (рис. 2–4).

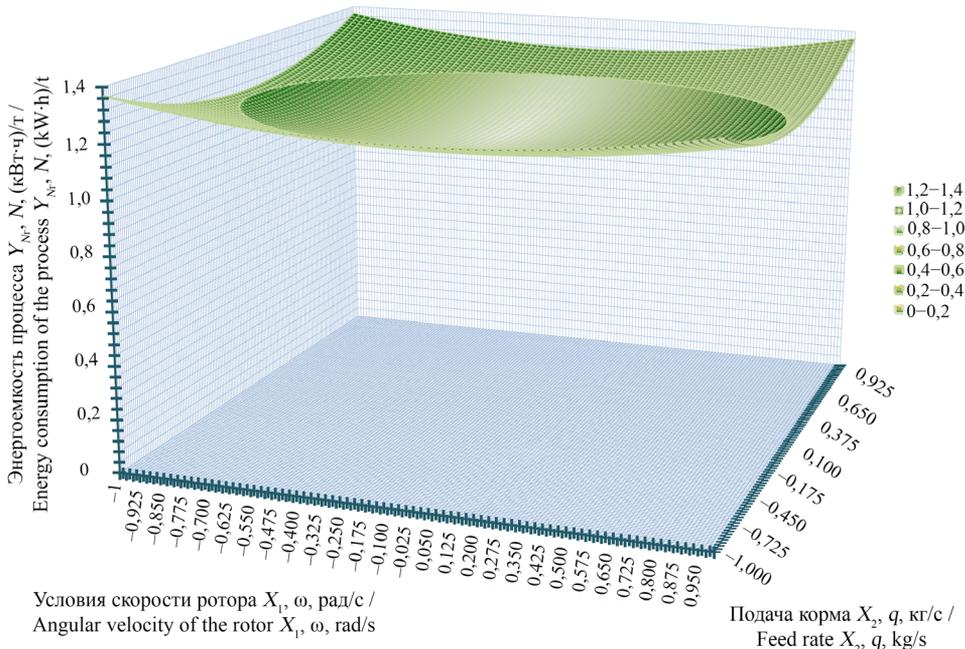
Таким образом, при измельчении грубых кормов (рис. 2) на энергоемкость наибольшее влияние оказывает подача кормов в камеру измельчения, имеющая нелинейный характер. Эффект от изменения частоты вращения ротора имеет постоянный линейный характер практически до основного уровня варьирования, а после этого, с увеличением частоты вращения, оно приобретает нелинейный характер.

Поверхность отклика, характеризующая влияние факторов на энергоемкость процесса измельчения зернистых кормов (рис. 3), имеет форму эллиптического параболоида. При этом влияние переменных факторов на энергоемкость почти одинаково, хотя относительно наибольшее влияние оказывает подача кормов в камеру измельчения.

Из графического изображения видно, что при измельчении корнеклубнеплодов возрастание энергоемкости процесса происходит одновременно с увеличением показателей обоих факторов (рис. 4). Следует также отметить и то, что влияние обоих факторов на энергоемкость процесса имеет нелинейную зависимость и параболоидную форму.

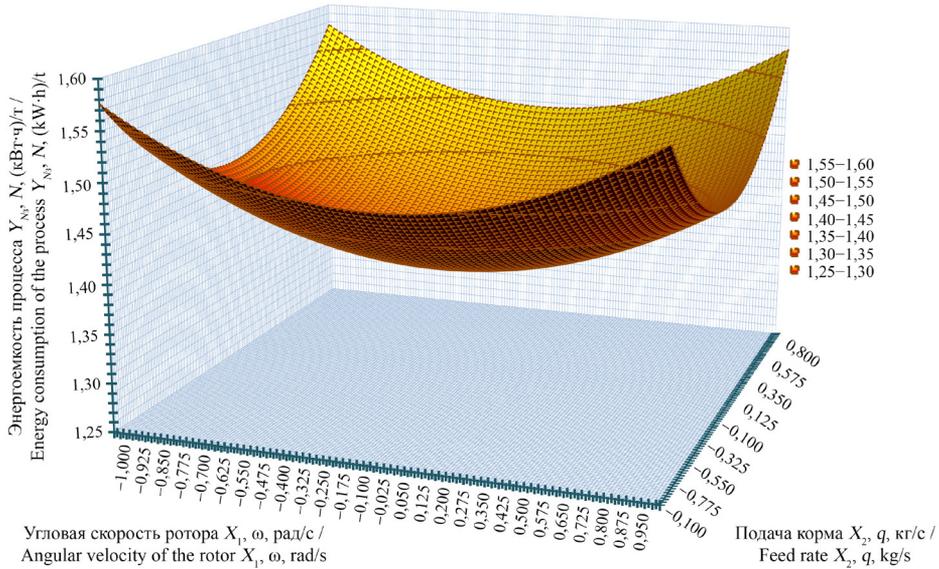
Главным фактором воздействия на энергоемкость процесса при измельчении всех видов кормов является подача кормов в камеру измельчения. Основной причиной увеличения энергоемкости процесса является возрастание силы резания в каждом сегменте рабочего органа в отдельности из-за увеличения за каждую единицу времени плотности проходящих через рабочий орган измельчителя кормов.

Поверхности точки оптимума (рис. 2–4) указывают на четко выраженную оптимальную область, которая позволяет определить факторы, обеспечивающие измельчение кормов при минимальной энергоемкости процесса, при котором условный оптимум функции представляет собой единственную точку, расположенную в центре поверхности, что дает наглядное представление о наиболее подходящей комбинации факторов, влияющих на процесс. Графический анализ поверхности точки оптимума позволяет определить оптимальные показатели факторов для каждого конкретного случая.



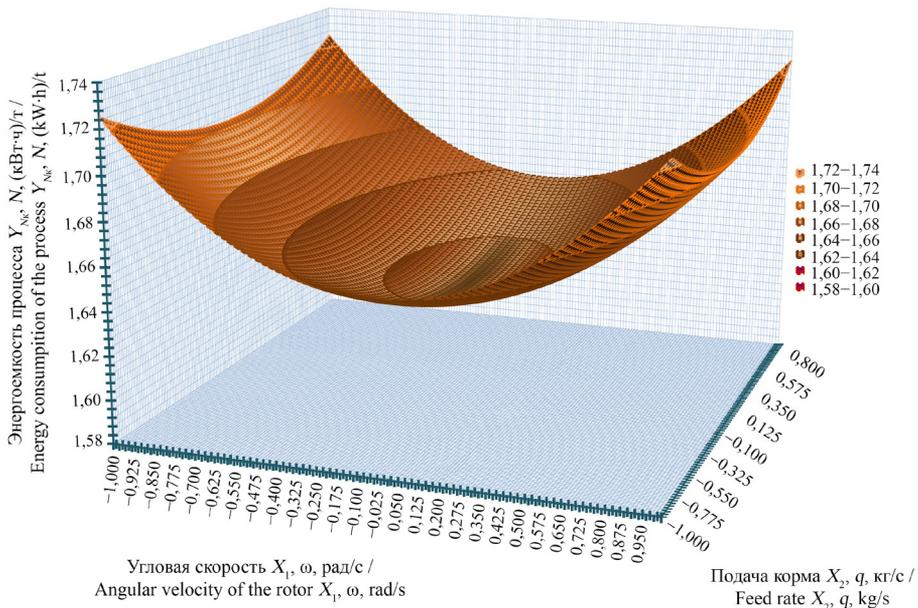
Р и с. 2. Поверхности точки оптимума для энергоемкости процесса измельчения грубых кормов  $(N - Y_{N^*})$ ,  $\frac{\text{кВт}\cdot\text{ч}}{\text{т}}$  как функция  $\omega - X_1$ , рад/с и  $q - X_2$ , кг/с

F i g. 2. Optimum point surfaces for the energy consumption of the coarse feed grinding process  $(N - Y_{N^*})$ ,  $\frac{\text{kW}\cdot\text{h}}{\text{t}}$  as a function of  $\omega - X_1$ , rad/s и  $q - X_2$ , kg/s



Р и с. 3. Поверхности точки оптимума для энергоемкости процесса измельчения зерновых кормов  $(N - Y_{N_3})$ ,  $\frac{\text{кВт}\cdot\text{ч}}{\text{т}}$  как функция  $\omega - X_1$ , рад/с и  $q - X_2$ , кг/с

F i g. 3. Optimum point surfaces for the energy consumption of the grain feed grinding process  $(N - Y_{N_3})$ ,  $\frac{\text{кВт}\cdot\text{ч}}{\text{т}}$  as a function of  $\omega - X_1$ , rad/s и  $q - X_2$ , kg/s

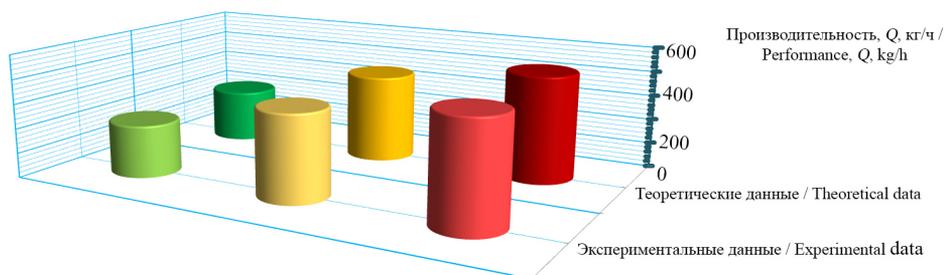


Р и с. 4. Поверхности точки оптимума для энергоемкости процесса измельчения корнеклубнеплодов  $(N - Y_{N_k})$ ,  $\frac{\text{кВт}\cdot\text{ч}}{\text{т}}$  как функция  $\omega - X_1$ , рад/с и  $q - X_2$ , кг/с

F i g. 4. Optimum point surfaces for the energy consumption of the root-tuber crop grinding process  $(N - Y_{N_k})$ ,  $\frac{\text{кВт}\cdot\text{ч}}{\text{т}}$  as a function of  $\omega - X_1$ , rad/s и  $q - X_2$ , kg/s

*Сравнительные показатели теоретических и экспериментальных данных процесса измельчения кормов.* При теоретическом обосновании производительности установки было определено, что оптимальная производительность достигается при скорости вращения ротора в диапазоне 205–211 рад/с.

Согласно теоретическим расчетам производительность установки составила для грубых кормов 0,06 кг/с (216 кг/ч), для зерновых кормов – 0,099 кг/с (356,4 кг/ч), для корнеклубнеплодных кормов – 0,120 кг/с (432 кг/ч) (рис. 5).



	Теоретические данные / Theoretical data	Экспериментальные данные / Experimental data
■ Грубые корма, $N$ (кВт·ч)/т / Coarse feeds, $N$ (kW·h)/t	216	213,48
■ Зернистые корма, $N$ (кВт·ч)/т / Granular feeds, $N$ (kW·h)/t	356,4	349,92
■ Корнеклубнеплоды, $N$ (кВт·ч)/т / Root and tuber crops, $N$ (kW·h)/t	432	424,80

Р и с. 5. Теоретические и экспериментальные данные производительности измельчительной установки

F i g. 5. Theoretical and experimental data on the performance of the grinding unit

По экспериментальным данным оптимальная производительность установки при скорости вращения ротора в диапазоне 205–211 рад/с для измельчения грубых кормов составила 0,0593 кг/с (213,48 кг/ч), для зерновых кормов – 0,0972 кг/с (349,92 кг/ч), а для корнеклубнеплодов – 0,1880 кг/с (424,80 кг/ч) (рис. 5).

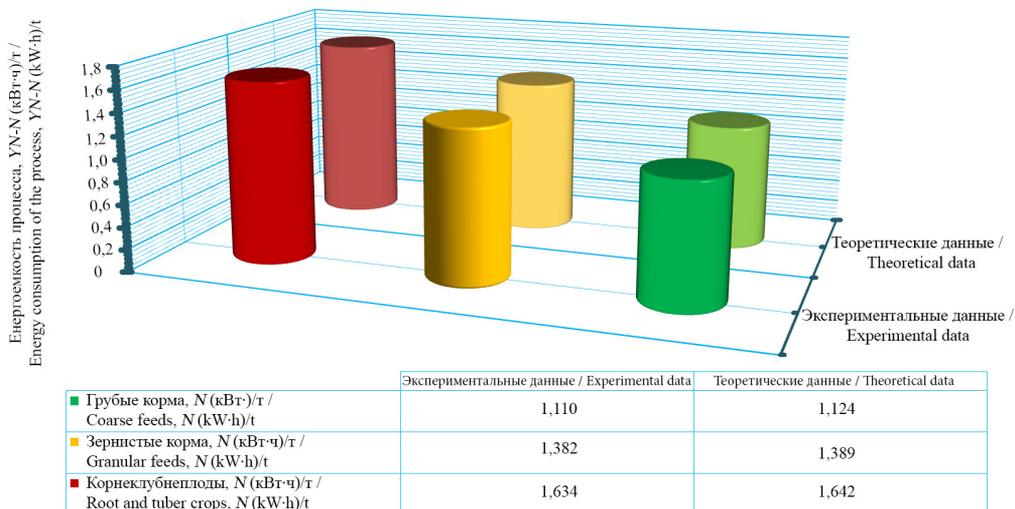
При теоретическом обосновании энергозатрат на измельчение корма было установлено, что минимальное потребление энергии достигается при частоте вращения рабочего органа в диапазоне 205–211 рад/с.

Теоретические значения энергозатрат для грубых кормов при этом составили  $1,124 \frac{\text{кВт}\cdot\text{ч}}{\text{т}}$ , для зерновых –  $1,389 \frac{\text{кВт}\cdot\text{ч}}{\text{т}}$ , для корнеклубнеплодов –  $1,642 \frac{\text{кВт}\cdot\text{ч}}{\text{т}}$  (рис. 6).

По экспериментальным данным минимальное потребление энергии установки при скорости вращения ротора в диапазоне 205–211 рад/с для измельчения грубых кормов составило  $1,110 \frac{\text{кВт}\cdot\text{ч}}{\text{т}}$ , для зерновых кормов –  $1,382 \frac{\text{кВт}\cdot\text{ч}}{\text{т}}$ , а для корнеклубнеплодов –  $1,634 \frac{\text{кВт}\cdot\text{ч}}{\text{т}}$  (рис. 6).

Разница между теоретическими и экспериментальными показателями по производительности для всех типов кормов составила 2 %, а по минимальному

энергопотреблению для грубых стебельчатых кормов – 1,5 %, для зерновых и корнеклубнеплодов – 0,5 %. Эти результаты подтверждают, что теоретические исследования хорошо согласуются с экспериментальными данными и отражают реальные процессы, происходящие при измельчении кормов.



Р и с. 6. Теоретические и экспериментальные данные энергоёмкости измельчительной установки  
 Fig. 6. Theoretical and experimental data on the energy consumption of the grinding unit

**Обсуждение и заключение.** Универсальность измельчителя с комбинированным молотково-сегментным режущим рабочим органом обеспечивает качественное измельчение кормов за счет скользящего резания и равномерного воздействия по длине и ширине перерабатываемого корма (многоплоскостное резание). Установка позволяет одновременно измельчать грубые, зерновые и корнеклубнеплодные корма без необходимости внесения изменений и перенастроек конструкции. Кроме того, возможность реверсирования направления вращения электродвигателя позволяет использовать режущие ножи с обеих сторон, что увеличивает их долговечность, значительно снижает энергозатраты и повышает производительность в процессе эксплуатации.

Полученные результаты экспериментальных исследований позволяют сделать следующие выводы:

- основным фактором воздействия на энергоёмкость процесса при измельчении всех видов кормов является подача кормов в камеру измельчения;
- основной причиной увеличения энергоёмкости процесса является увеличение силы резания в каждом сегменте рабочего органа в отдельности, вследствие увеличения за каждую единицу времени плотности корма, проходящего через рабочий орган измельчителя.

Результаты, полученные в ходе экспериментальных исследований, предоставляют возможность для оптимизации рабочих процессов универсальной установки,

разработанной для измельчения кормов. Такая установка предназначена для использования в фермерских животноводческих хозяйствах, специализирующихся на разведении крупного рогатого скота. Полученные данные позволяют уточнить и улучшить ключевые параметры работы оборудования, такие как степень измельчения кормов, энергоэффективность, производительность и удобство эксплуатации. Таким образом происходит повышение качества кормовой базы, снижение затрат на приготовление кормов и улучшение условий содержания животных, что положительно сказывается на их продуктивности и общей экономической эффективности хозяйства.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Chernovol M., Sviren M., Kisiliov R. Study of the Process of Preparing Feeding Mixtures Using the Composite Mixer. *Agricultural Science and Practice*. 2018;5(1):17–22. <https://doi.org/10.15407/agrisp5.01.017>
2. Atanov I.V., Kapustin I.V., Grinchenko V.A., Gritsay D.I., Kapustina E.I. Improving Efficiency of Feeding Cattle. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 2016;7(4):1927–1932. Available at: [https://www.rjpbcs.com/pdf/2016\\_7\(4\)/%5b248%5d.pdf](https://www.rjpbcs.com/pdf/2016_7(4)/%5b248%5d.pdf) (accessed 25.08.2024).
3. VandeHaar M.J. Feeding and Breeding for a More Efficient Cow. *WCDS Advances in Dairy Technology*. 2018;26:17–30. Available at: <https://clck.ru/3GbgWF> (accessed 25.08.2024).
4. Морозов Н.М., Рассказов А.Н. Направления механизации животноводства в малых формах хозяйствования. *Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства*. 2017;2(26). URL: <https://clck.ru/3Gbgqe> (дата обращения: 24.08.2024).  
Morozov N.M., Rasskazov A.N. The Direction of Animal Husbandry Mechanization on the Small Forms of Household. *Vestnik Vserossijskogo Nauchno-Issledovatel'skogo Instituta Mekhanizacii Zhivotnovodstva*. 2017;2(26). (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://clck.ru/3Gbgqe> (accessed 24.08.2024).
5. Лепшина А.И., Белоусов С.В. Средства малой механизации как основа современного КФХ и ЛПХ в малых формах хозяйствования. *Научный журнал КубГАУ*. 2015;109. URL: <http://ej.kubagro.ru/2015/05/pdf/24.pdf> (дата обращения: 24.08.2024).  
Lepshina A.I., Belousov S.V. Means of Small Mechanization as a Basis of Modern PFF and PBF in Small Forms of Management. *Scientific Journal of KubSAU*. 2015;109. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <http://ej.kubagro.ru/2015/05/pdf/24.pdf> (accessed 24.08.2024).
6. Солонщиков П.Н., Косолапов Е.В. Совершенствование и повышение эффективности технологического процесса приготовления и раздачи грубых кормов на фермах крупного рогатого скота. *Вестник НГИЭИ*. 2018;5(84):54–66. URL: [https://vestnik.ngiei.ru/?page\\_id=1627](https://vestnik.ngiei.ru/?page_id=1627) (дата обращения: 24.08.2024).  
Solonshchikov P.N., Kosolapov E.V. Improvement and Increase of Efficiency of Technological Process of Preparation and Distribution of Fodder on Farms Cattle. *Bulletin NGIEI*. 2018;5(84):54–66. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: [https://vestnik.ngiei.ru/?page\\_id=1627](https://vestnik.ngiei.ru/?page_id=1627) (accessed 24.08.2024).
7. Ларетин Н.А., Шпаков А.С. Организация специализированного кормопроизводства в животноводческих хозяйствах молочного направления Российской Нечерноземья. *Вестник ВНИИМЖ*. 2015;2(18):169–177. EDN: TZBBUX  
Laretin N.A., Shpakov A.S. [Organization of Specialized Feed Production in Livestock Farms of the Dairy Sector of the Russian Non-Chernozem Region]. *Vestnik VNIIMZH*. 2015;2(18):169–177. (In Russ.) EDN: TZBBUX
8. Ларетин Н.А. Особенности модернизации и создания устойчивой кормовой базы молочного скотоводства Нечерноземной зоны Российской Федерации. *Вестник ВНИИМЖ*. 2011;3(3). URL: <https://clck.ru/3GcRtu> (дата обращения: 23.08.2024).

- Laretin N.A. [Features of Modernization and Creation of a Sustainable Feed Base for Dairy Cattle Breeding in the Non-Chernozem Zone of the Russian Federation]. *Vestnik VNIIMZH*. 2011;3(3). (In Russ.) Available at: <https://clck.ru/3GcRtu> (accessed 23.08.2024).
9. Эшкобилова М.Ш., Холмуродова З.Д. Научное значение современных способов производства кормов и их качественные показатели. *Universum: технические науки*. 2024;3(120):12–15. URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/17025> (дата обращения: 23.08.2024).  
Eshkobilova M.Sh., Kholmurodova Z.D. Scientific Importance of Modern Methods of Feed Production and their Quality Indicators. *Universum: Tekhnicheskie Nauki*. 2024;3(120):12–15. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/17025> (accessed 23.08.2024).
  10. Булатов С.Ю. Повышение эффективности приготовления кормов путем совершенствования конструкции и технологического процесса кормоприготовительных машин. *Пермский аграрный вестник*. 2017;1(17). URL: <https://clck.ru/3GcTXX> (дата обращения: 25.08.2024).  
Bylatov S.Yu. [Improving the Efficiency of Feed Preparation by Improving the Design and Technological Process of Feed Preparation Machines]. *Permskij Agrarnyj Vestnik*. 2017;1(17). (In Russ.) Available at: <https://clck.ru/3GcTXX> (accessed 25.08.2024).
  11. Солонщиков П.Н., Мошонкин А.М., Доронин М.С. Совершенствование машин и оборудования в производстве кормов в животноводстве. *Вестник НГИЭИ*. 2017;9(76):64–76. EDN: ZJTXET  
Solonshchikov P.N., Moshonkin A.M., Doronin M.S. Improvement of Machinery and Equipment in the Production of Fodder. *Bulletin NGIEI*. 2017;9(76):64–76. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: ZJTXET
  12. Pretty J., Benton T.G., Bharucha Z.P., Dicks L.V., Flora C.B., Godfray H.J., et al. Global Assessment of Agricultural System Redesign for Sustainable Intensification. *Nature Sustainability*. 2018;1:441–446. <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0114-0>
  13. Zhao C., Liu B., Piao S., Wang X., Lobell D.B., Huang Y., et al. Temperature Increase Reduces Global Yields of Major Crops in Four Independent Estimates. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2017;114(35):9326–9331. <https://doi.org/10.1073/pnas.1701762114>
  14. Van Loo E.J., Caputo V., Nayga R.M., Meullenet J.-F., Ricke S.C. Consumers' Willingness to Pay for Organic Chicken Breast: Evidence from Choice Experiment. *Food Quality and Preference*. 2011;22(7):603–613. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2011.02.003>
  15. Lowder S.K., Scoet J., Raney T. The Number, Size, and Distribution of Farms, Smallholder Farms, and Family Farms Worldwide. *World Development*. 2016;87:16–29. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2015.10.041>
  16. Herrero M., Thornton P.K., Mason-D'Croz D., Palmer J., Benton T.G., Bodirsky B.L., et al. Innovation Can Accelerate the Transition Towards a Sustainable Food System. *Nature Food*. 2020;1:266–272. <https://doi.org/10.1038/s43016-020-0074-1>
  17. Ayugin N., Isaychev V., Khalimov R., Semashkin N. Method and Results of Studying the Influence of Grinder Knife Parameters on Specific Work of Feed Cutting. *BIO Web of Conferences. International Scientific-Practical Conference "Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources"*. 2021;37:00022. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20213700022>
  18. Новиков В.В., Зотеев В.С., Камышева О.А., Грецов А.С. Результаты производственных испытаний экспериментального измельчителя корнеплодов. *Известия ОГАУ*. 2017;2(64):74–76. EDN: YMXGRH  
Novikov V.V., Zoteev V.S., Kamysheva O.A., Gretsov A.S. [Results of Production Testing of an Experimental Root Crop Grinder]. *Izvestia OSAU*. 2017;2(64):74–76. (In Russ.) EDN: YMXGRH
  19. Новиков В.В., Мишанин А.Л., Успенская И.В., Никитин В.А., Камышева О.А. Универсальный шнековый измельчитель кормов. Патент 142728 Российская Федерация. 27 июня 2014. EDN: YHFCWX  
Novikov V.V., Mishanin A.L., Uspenskaya I.V., Nikitin V.A., Kamysheva O.A. [Universal Screw Feed Grinder]. Patent 142728 Russian Federation. 2014 June 27. (In Russ.) EDN: YHFCWX
  20. Marczuk A., Blicharz-Kania A., Savinykh P.A., Isupov A.Y., Palichyn A.V., Ivanov I.I. Studies of a Rotary-Centrifugal Grain Grinder Using a Multifactorial Experimental Design Method. *Sustainability*. 2019;11(19):5362. <https://doi.org/10.3390/su11195362>

21. Абалихин А.М., Барабанов Д.В., Крупин А.В., Муханов Н.В. Оценка эффективности работы центробежного измельчителя фуражного зерна. *АгроЭкоИнженерия*. 2024;1(118):43–57. <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2024-1118-43-56>  
Abalikhin A.M., Barabanov D.V., Krupin A.V., Mukhanov N.V. Evaluation of Performance Efficiency of Centrifugal Feed Grain Grinder. *AgroEkoEngineering*. 2024;1(118):43–57. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2024-1118-43-56>
22. Волхонов М.С., Абалихин А.М., Крупин А.В. Обоснование конструкционных параметров нового измельчителя фуражного зерна. *Вестник НГИЭИ*. 2020;11(114):5–16. <https://doi.org/10.24411/2227-9407-2020-10101>  
Volhonov M.S., Abalihin A.M., Krupin A.V. Justification of Design Parameters of a New Forage Grain Grinder. *Bulletin NGIEI*. 2020;11(114):5–16. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.24411/2227-9407-2020-10101>
23. Фаталиев К.Г., Мамедов И.О., Кулиев З.В., Мамедов Х.А., Зейналов А.М., Мамедов Д.А., и др. Универсальный измельчитель кормов. Патент 2776311 Российская Федерация. 18 июля 2022. URL: <https://findpatent.ru/patent/277/2776311.html> (дата обращения: 25.08.2024).  
Fataliev K.G., Mamedov I.O., Kuliev Z.V., Mamedov H.A., Zeynalov A.M., Mamedov D.A., et al. [Universal Feed Grinder]. Patent 2776311 Russian Federation. 2022 July 18. (In Russ.) Available at: <https://findpatent.ru/patent/277/2776311.html> (accessed 25.08.2024).

*Об авторах:*

**Кулиев Закир Вагиф оглы**, заведующий лабораторией механизации и автоматизации технологических процессов в животноводстве Научно-исследовательского Института «Агромеханика» Азербайджанского государственного аграрного университета (Az2000, Азербайджан, г. Гянджа, пр-т Атаюрка, 450), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6090-1853>, [vaqifizz@gmail.com](mailto:vaqifizz@gmail.com)

**Якубов Камал Гаджи оглы**, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории механизации и автоматизации технологических процессов в животноводстве Научно-исследовательского Института «Агромеханика» Азербайджанского государственного аграрного университета (Az2000, Азербайджан, г. Гянджа, пр-т Атаюрка, 450), ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1426-5581>, [yaqubov.k@gmail.com](mailto:yaqubov.k@gmail.com)

**Алиев Эльман Мухтар оглы**, старший научный сотрудник лаборатории механизации и автоматизации технологических процессов в животноводстве Научно-исследовательского Института «Агромеханика» Азербайджанского государственного аграрного университета (Az2000, Азербайджан, г. Гянджа, пр-т Атаюрка, 450), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5371-2667>, [bozhan@gmail.com](mailto:bozhan@gmail.com)

*Заявленный вклад авторов:*

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

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

Э. М. Алиев – 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 25.10.2024; поступила после рецензирования 08.11.2024;  
принята к публикации 15.11.2024*

*About the authors:*

**Zakir V. Quliyev**, Head of the Mechanization and Automation of Technological Processes in Animal Husbandry Laboratory, Scientific Research Institute “Agromechanics”, Azerbaijan State Agrarian University (450 Ataturk Ave., Ganja Az2000, Azerbaijan), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6090-1853>, [vaqifizz@gmail.com](mailto:vaqifizz@gmail.com)

**Kamal H. Yaqubov**, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, Leading Researcher of the Mechanization and Automation of Technological Processes in Animal Husbandry Laboratory, Scientific Research Institute “Agromechanics”, Azerbaijan State Agrarian University (450 Ataturk Ave., Ganja Az2000, Azerbaijan), ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1426-5581>, [yaqubov.k@gmail.com](mailto:yaqubov.k@gmail.com)

**Elman M. Aliev**, Senior Researcher of the Mechanization and Automation of Technological Processes in Animal Husbandry Laboratory, Scientific Research Institute “Agromechanics”, Azerbaijan State Agrarian University (450 Ataturk Ave., Ganja Az2000, Azerbaijan), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5371-2667>, [bozخان@gmail.com](mailto:bozخان@gmail.com)

*Authors contribution:*

Z. V. Kuliev – conducting the study, specifically performing the experiments and collecting data; preparing the manuscript: critical analysis of the draft manuscript, making comments and corrections by members of the research team including at the pre- and post-publication stages.

K. G. Yakubov – conducting the study, specifically performing the experiments and collecting data; preparing the manuscript, specifically visualizing the study results and the data obtained.

E. M. Aliev – conducting the study, specifically performing the experiments and collecting data; preparing the manuscript, specifically visualizing the study results and the data obtained.

*All authors have read and approved the final manuscript.*

*Submitted 25.10.2024; revised 08.11.2024; accepted 15.11.2024*

**ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ /  
TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT**<https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202501.139-154>EDN: <https://elibrary.ru/wfxqhh>

УДК 631.362.3

ISSN Print 2658-4123

ISSN Online 2658-6525

<https://vestnik.mrsu.ru>*Оригинальная статья / Original article***Обоснование конструктивных параметров  
очистителя корнеплодов от почвы****В. И. Курдюмов** , **Ю. М. Исаев**,**А. А. Павлушин, Е. М. Горельшев***Ульяновский государственный аграрный университет  
имени П. А. Столыпина**(г. Ульяновск, Российская Федерация)* [vova73ulgau@yandex.ru](mailto:vova73ulgau@yandex.ru)**Аннотация**

**Введение.** Задача качественной очистки корнеплодов от почвы актуальна на всех стадиях их подготовки к переработке, продаже и скармливанию животным. Применяемые машины для очистки корнеплодов от загрязнений чаще всего используют воду. При затратах до 200–400 % воды на мойку единицы массы загрязненных корнеплодов ее использование создает огромную проблему, в том числе и по очистке загрязненной воды. Наиболее распространенный в практике сухой способ очистки корнеплодов связан с использованием соответствующих машин, которые не всегда способны обеспечить требуемое качество готового продукта. Поэтому разработка очистителя корнеплодов, реализующего сухой способ очистки, и обоснование его оптимальных параметров, обеспечивающих требуемое качество готовой продукции, является важной и актуальной задачей.

**Цель исследования.** Теоретическое обоснование конструктивно-режимных параметров очистителя корнеплодов со смежными роликами, вращающимися с разной частотой, а также установление взаимосвязи между этими параметрами.

**Материалы и методы.** Объектом исследования стал технологический процесс очистки корнеплодов сухим способом. Для реализации этого процесса разработан и предложен очиститель корнеплодов от почвы, принципиальными особенностями которого являются использование роликового транспортирующе-очищающего рабочего органа и придание смежным роликам возможности вращения с различной частотой. Выполнено теоретическое обоснование отдельных конструктивных параметров предложенного очистителя.

**Результаты исследования.** Определены силы, действующие на корнеплод при его расположении на вращающихся роликах. Получена зависимость углового перемещения  $\varphi(t)$  и угловой скорости  $\omega(t)$  корнеплода, находящегося на вращающихся роликах, а также зависимость коэффициента трения скольжения корнеплода о ролик от угла  $\alpha$ , определяющего взаимосвязь основных конструктивных параметров рабочего органа, в частности, диаметра роликов и расстояния между ними, и физико-механических свойств корнеплодов.

**Обсуждение и заключение.** Проведенные исследования очистителя корнеплодов в лабораторных условиях подтвердили результаты теоретических исследований и показали, что при длине транспортирующе-очищающего рабочего органа 2 м

© Курдюмов В. И., Исаев Ю. М., Павлушин А. А., Горельшев Е. М., 2025

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

за время 34,4 с можно достичь эффективности очистки 78 % при оснащении машины 16 роликами и соотношении частот вращения нечетных и четных роликов 220/250 мин<sup>-1</sup>. Результаты исследований будут полезны при создании и модернизации технических средств по послеуборочной обработке корнеплодов, проведении дальнейших исследований по технологическому совершенствованию аналогичных средств механизации сельскохозяйственных процессов, а также в учебном процессе при подготовке технических специалистов.

**Ключевые слова:** корнеплоды, очиститель, почва, конструктивные параметры, ролики, коэффициент трения

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Курдюмов В.И., Исаев Ю.М., Павлушин А.А., Горельшев Е.М. Обоснование конструктивных параметров очистителя корнеплодов от почвы. *Инженерные технологии и системы*. 2025;35(1):139–154. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202501.139-154>

## Substantiating the Design Parameters of a Cleaner of Root Crops from Soil

V. I. Kurdyumov , Yu. M. Isaev,  
A. A. Pavlushin, E. M. Gorelyshev

*Ulyanovsk State Agrarian University named after P. A. Stolypin  
(Ulyanovsk, Russian Federation)*

 vova73ulgau@yandex.ru

### Annotation

**Introduction.** The task of high-quality cleaning of root crops from soil is relevant at all stages of preparing roots for further processing, feeding to animals, and selling. In the machines for cleaning root crops from soil, there is mostly used water. With the water consumption for washing a unit of mass of soiled root crops up to 200–400%, the use of water creates a huge problem including soiled water treatment. The dry method of cleaning root crops is most common in practice and involves the use of appropriate machines, which are not always able to provide the required quality of the finished product. Therefore, the problem of developing a root crop cleaner by the dry cleaning method and substantiating the cleaner optimal parameters to ensure the required quality of the finished product is important and relevant.

**Aim of the Study.** The study is aimed at substantiating theoretically the parameters of a root cleaner with adjacent rollers rotating at different frequencies.

**Materials and Methods.** The subject of the study is the technological process of cleaning root crops with the dry method. To realize this process, there has been developed a cleaner of root crops from soil, the key features of which are the use of a roller transport-cleaning working element and the ability of adjacent rollers rotate at different frequencies. Individual design parameters of the proposed cleaner have been substantiated theoretically.

**Results.** There have been determined the forces acting on the root crop when it is located on rotating rollers. There has been found the dependence of the angular displacement  $\varphi(t)$ , angular velocity  $\omega(t)$  of the root crop located on rotating rollers, and the dependence of the coefficient of root crop sliding friction on the rollers on the angle  $\alpha$ , which determines the relationship between the main design parameters of the working element, in particular, the diameter of the rollers and the distance between them, and the physical and mechanical properties of the root crops.

**Discussion and Conclusion.** The studies of the root crop cleaner conducted in laboratory conditions have confirmed the results of theoretical studies and showed that with a length of the transport-cleaning working element of 2 m within a time of 34,4 s

it is possible to achieve an efficient cleaning of 78% when the cleaner is equipped with 16 rollers and the ratio of the rotation frequencies for odd and even rollers is 220/250 min<sup>-1</sup>. The study results are useful for creating and modernizing technical means for post-harvest processing of root crops, conducting further studies on technological improvement of similar means of mechanization of agricultural processes, and for using in the educational process to train technical specialists.

**Keywords:** root crops, cleaner, soil, design parameters, rollers, friction coefficient

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

**For citation:** Kurdyumov V.I., Isaev Yu.M., Pavlushin A.A., Gorelyshev E.M. Substantiating the Design Parameters of a Cleaner of Root Crops from Soil. *Engineering Technologies and Systems*. 2025;35(1):139–154. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202501.139-154>

**Введение.** Задача качественной очистки корнеплодов от почвы актуальна не только на стадии их уборки, но и на стадиях подготовки к скармливанию животным, переработки и продажи. Например, средняя минимальная стоимость неочищенного от почвы картофеля составляет 44 руб. за кг, а цена продажи чистого картофеля, подготовленного для жарки, может превышать данную стоимость в 2,27 раза<sup>1</sup>. Применяемые для очистки корнеплодов от загрязнений стационарные машины при реализации технологического процесса в основном используют воду [1; 2]. Учитывая, что на мойку единицы массы загрязненных корнеплодов требуется до 200–400 % воды<sup>2</sup>, на очистку только собираемого в Российской Федерации урожая картофеля потребуется 15–35,2 тыс. т чистой воды, которую в последующем необходимо очистить. Способы очистки корнеплодов с использованием вибраций, ультразвука или теплоты отработавших газов двигателей внутреннего сгорания [3–5] требуют дополнительных устройств [6; 7], что усложняет конструкцию машин, снижает их производительность. Такие машины также могут быть экологически небезопасными. Более предпочтителен сухой способ очистки корнеплодов<sup>3</sup> [8–10], однако выпускаемые машины [11] для реализации этого способа [12; 13] не всегда способны обеспечить требуемое качество готового продукта<sup>4</sup> [14–16]. Поэтому создание очистителя корнеплодов, реализующего сухой способ очистки, и обоснование его оптимальных параметров, обеспечивающих требуемое качество готовой продукции, является важной и актуальной задачей.

Целью проводимых научных изысканий стала интерпретация на основе теоретических аспектов режимных и конструктивных характеристик разрабатываемого

<sup>1</sup> Шишкина Т. Кто накормит Россию картошкой. Парламентская газета [Электронный ресурс]. URL: <https://www.pnp.ru/economics/kto-nakormit-rossiyu-kartoshkoy.html>. (дата обращения: 20.11.2024).

<sup>2</sup> Яровенко В. Л., Устинников Б. А., Богданов Ю. П., Громов С. И. Справочник по производству спирта. Сырье, технология и технадзор. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. 336 с.

<sup>3</sup> Яковлева А. О., Виноградов Н. Н., Захаров С. В. Анализ устройств для сухой очистки корнеклубнеплодов // Актуальные вопросы науки и практики : сборник науч. тр. по материалам XIX Междунар. науч.-практ. конф. (4 апреля 2020 г., г. Анапа). Анапа : НИЦ ЭСП, 2020. С. 105–108. EDN: MUMAJV

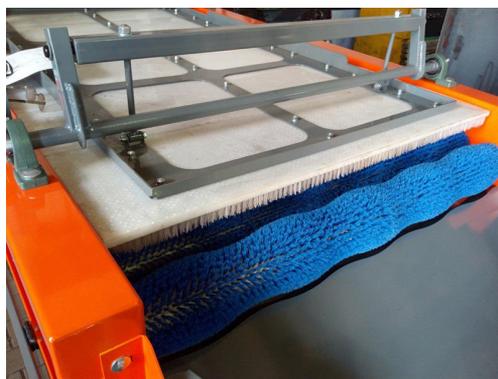
<sup>4</sup> Агейчик В. А., Романюк Н. Н., Гильдюк К. В., Хартанович А. М. К вопросу повышения качества очистки корнеплодов от почвы // Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях : материалы IX Междунар. науч.-практ. конф. (27 – 28 апреля 2022 г., г. Саратов). Саратов : Амирит, 2022. С. 433–437. EDN: ACASKF

очистителя корнеплодов, конструктивной особенностью которого являются вращающиеся с различной частотой ролики.

**Обзор литературы.** Машины для сухой очистки корнеплодов, как правило, используют в качестве элементов рабочего органа щетки различного типа, щетинки которых выполнены из нейлона, полиамида, полиэстера, капрона и других материалов [11]. Например, машина для сухой очистки овощей МСО-1011 (рис. 1) массой 450 кг и пропускной способностью до 8 т/ч имеет 10 щеточных валов шириной 1 100 мм. По требованию заказчика производитель может снабдить машину либо прямыми, либо волнообразными нейлоновыми щетками.



а)



б)

Р и с. 1. Машина для сухой очистки овощей МСО-1011:  
а) общий вид; б) основной рабочий орган

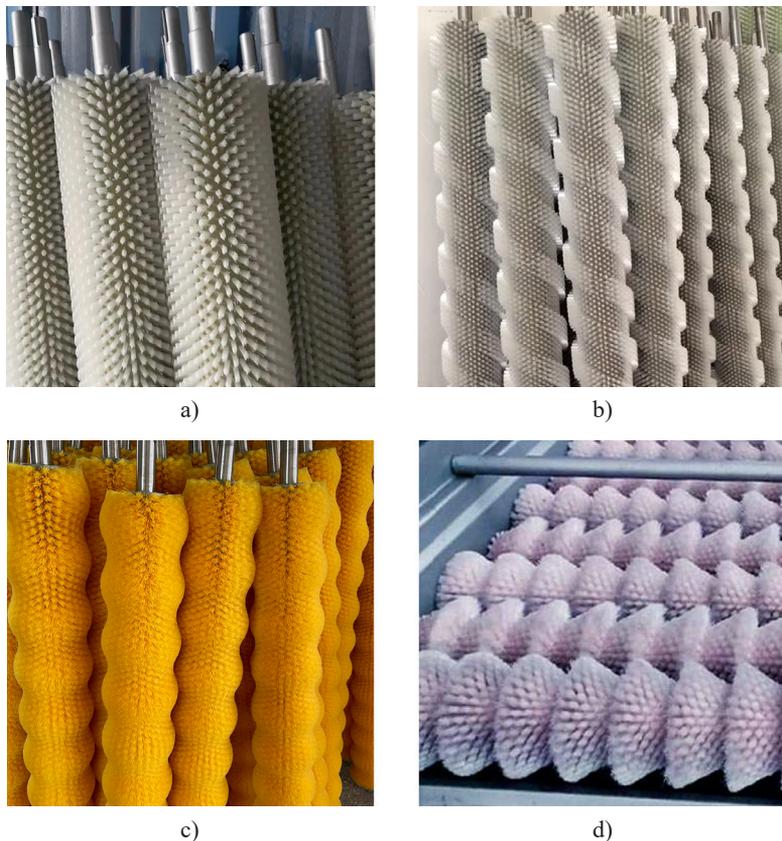
F i g. 1. Machine for dry cleaning of vegetables MSO-1011:  
а) general view; б) main working element

*Источник:* изображения взяты из источников: а) <https://polag.ru/shop/mashina-dlya-suhjoj-ochistki-mso-1011/>; б) <https://zen.ru/a/YPRPPZy68G9onXE9>.

*Source:* image is taken from source а) <https://polag.ru/shop/mashina-dlya-suhjoj-ochistki-mso-1011/>; б) <https://zen.ru/a/YPRPPZy68G9onXE9>.

Модели МСО-1611 и МСО-1616 отличаются пропускной способностью (до 12 т/ч и до 18 т/ч соответственно), количеством щеточных валов, массой и большей стоимостью, достигающей у упомянутой последней модели 1,4 млн руб.

Качество очистки корнеплодов от загрязнений во многом определяется как качеством самих щеток, так и их формой (рис. 2). Лучшую степень очистки обеспечивают щетки, выполненные из качественных материалов и имеющие форму волны.



Р и с. 2. Формы щеток:  
а) цилиндрическая; б) ступенчатая винтовая; в) волновая; д) ступенчатая коническая

F i g. 2. Brush shapes:  
a) cylindrical; b) stepped helical; c) wave; d) stepped conical

*Источник:* изображения взяты из источников: а) <https://clck.ru/3GS47Z>; б) <https://clck.ru/3GS3tr>; в) <https://clck.ru/3GS3zJ>; д) <https://clck.ru/3GS4Gj>.

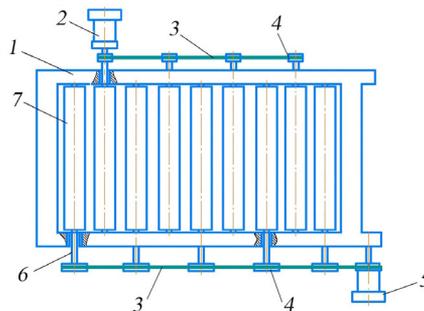
*Source:* images are taken from source: а) <https://clck.ru/3GS47Z>; б) <https://clck.ru/3GS3tr>; в) <https://clck.ru/3GS3zJ>; д) <https://clck.ru/3GS4Gj>.

Качество очистки корнеплодов повышается при снабжении машины механизмом, который прижимает корнеплод к щеткам. Простейшее устройство представляет собой установленный над щетками лист эластичного материала, например, плотной резины.

Регулировать качество очистки корнеплодов в машинах подобного типа можно, изменяя частоту вращения щеток, их форму и материал щетинок, а также давление прижимного устройства. Следует отметить, что при изменении частоты вращения щеток кроме качества очистки корнеплодов меняется и пропускная способность устройства. Замена самих щеток вызывает дополнительные затраты денежных средств. Рост давления прижимающего устройства повышает качество очистки, но при этом увеличивается повреждаемость корнеплодов. Поэтому перспективными следует считать очистители корнеплодов, в которых качество очистки не связано с изменением пропускной способности машины.

**Материалы и методы.** Для улучшения качества очистки корнеплодов от загрязнений в Ульяновском аграрном университете разработан инновационный очиститель, основным рабочим органом которого является роликовый транспортер [17–19]. Роликовые транспортеры (рольганги) содержат установленные на раме параллельно друг другу с зазором и с возможностью вращения в подшипниках ролики. Ролики приводных рольгангов получают вращение обычно от электродвигателя через передачу определенного типа (цепную, ременную и т. д.) [20]. Транспортирование происходит за счет сил трения, возникающих между нижней поверхностью перемещаемых предметов и поверхностью вращающихся роликов. Рольганги характеризует высокая пропускная способность и минимальный риск повреждения транспортируемых грузов.

Принципиальной отличительной особенностью разработанного очистителя (рис. 3) является придание смежным роликам возможности вращения с различной частотой. Для этого четные и нечетные ролики приводятся во вращение с разных сторон транспортера. Используя инверторные электродвигатели или сменные звездочки с разным числом зубьев, можно задать роликам как разную частоту вращения, так и изменять разность частот вращения между соседними роликами. Это позволяет, в зависимости от степени загрязнения исходного материала, либо обеспечить большую пропускную способность очистителя, либо улучшить качество очистки корнеплодов.



Р и с. 3. Очиститель корнеплодов:  
 1 – рама; 2 – привод четных роликов; 3 – цепи; 4 – звездочки;  
 5 – привод нечетных роликов; 6 – вал; 7 – ролики

F i g. 3. Root crop cleaner:

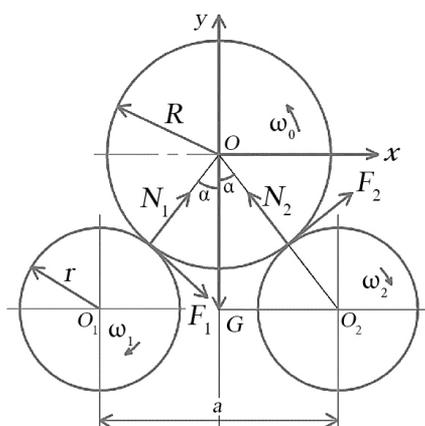
1 – frame; 2 – even roller drive; 3 – chains; 4 – sprockets; 5 – odd roller drive; 6 – shaft; 7 – rollers

*Источник:* здесь и далее рисунки составлены авторами статьи.

*Source:* hereinafter in this article the diagrams are compiled compiled by the authors of the article.

В качестве исследуемого материала был принят картофель сорта Гала со средней массой клубней 0,071–0,122 кг и преимущественно продолговатой формой. При движении по основному рабочему органу клубень ориентируется длинной стороной параллельно роликам очистителя и за счет сил трения получает вращение, частота которого зависит как от коэффициента трения между клубнем и роликом, так и от разности частот вращения смежных роликов. Качество очистки клубней зависит от времени прохождения клубня через основной рабочий орган, частоты вращения клубня и упомянутого выше коэффициента трения [21; 22].

Рассмотрим движение клубня картофеля по двум роликам очистителя. С определенным допущением примем поперечное сечение перемещаемого корнеплода в виде окружности. Тогда элемент клубня малой толщины можно представить в виде диска, который получает вращение при соприкосновении с вращающимися роликами (рис. 4).



Р и с. 4. Силы, действующие на диск при его расположении на вращающихся роликах  
F i g. 4. Forces acting on the disk when it is located on rotating rollers

Вначале рассмотрим условие, при котором угловая скорость вращения роликов  $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ . Коэффициент трения диска о ролик равен  $\mu$ . Определим время, за которое диск начнет вращаться с той же линейной скоростью, что и ролики в точке касания с диском при условии его движения без скольжения.

На диск действует сила тяжести  $G = mg$ , реакции поверхности роликов  $N_1$  и  $N_2$ , силы трения между роликами и диском  $F_1$  и  $F_2$  соответственно (рис. 4). Линии действия силы тяжести и сил реакции валиков проходят через ось вращения диска, поэтому момент этих сил относительно этой оси равен нулю. Следовательно, угловое ускорение диска обусловлено моментами сил трения.

Запишем уравнение вращательного движения диска:

$$I \frac{d\omega}{dt} = R(F_1 + F_2), \quad (1)$$

где  $I = 0,5 mR^2$  – момент инерции диска относительно оси вращения, кг м<sup>2</sup>;  $m$  – масса диска, кг;  $R$  – радиус диска, м.

Силы трения  $F_1$  и  $F_2$  определяются реакциями роликов на диск:

$$F_1 = \mu_1 N_1 \quad \text{и} \quad F_2 = \mu_2 N_2,$$

где  $\mu_1, \mu_2$  – коэффициенты трения диска о первый и второй ролики соответственно.

Силы реакции роликов  $N_1$  и  $N_2$  найдем из равенства нулю суммы проекций сил на вертикальную ось  $Oy$ :

$$N_1 \cos \alpha + N_2 \cos \alpha + F_1 \sin \alpha - F_2 \sin \alpha - mg = 0; \quad (2)$$

$$N_1 \sin \alpha - N_2 \cos \alpha + F_1 \cos \alpha + F_2 \cos \alpha = 0. \quad (3)$$

Подставив в уравнения (2) и (3) значения  $F_1$  и  $F_2$  соответственно, получим:

$$N_1 \cos \alpha + N_2 \cos \alpha + \mu_1 N_1 \sin \alpha - \mu_2 N_2 \sin \alpha - mg = 0; \quad (4)$$

$$N_1 \sin \alpha - N_2 \sin \alpha + \mu_1 N_1 \cos \alpha + \mu_2 N_2 \cos \alpha = 0. \quad (5)$$

Решив систему уравнений (4) и (5), найдем реакции роликов:

$$N_1 = \frac{mg(\mu_2 - \operatorname{tg} \alpha)}{\cos \alpha \left[ (\mu_2 \operatorname{tg} \alpha + 1)(\mu_2 - \operatorname{tg} \alpha) + (\operatorname{tg} \alpha + \mu_1)(1 - \mu_2 \operatorname{tg} \alpha) \right]};$$

$$N_2 = \frac{mg(\operatorname{tg} \alpha + \mu_1)}{\cos \alpha \left[ (\mu_2 \operatorname{tg} \alpha + 1)(\mu_2 - \operatorname{tg} \alpha) + (\operatorname{tg} \alpha + \mu_1)(1 - \mu_2 \operatorname{tg} \alpha) \right]}.$$

Подставив полученные выражения в дифференциальное уравнение (1), получим:

$$\frac{mR^2}{2} \cdot \frac{d\omega}{dt} = \frac{mRg(2\mu_1\mu_2 + (\mu_1 + \mu_2)\operatorname{tg} \alpha)}{\cos \alpha \left[ (\mu_2 \operatorname{tg} \alpha + 1)(\mu_2 - \operatorname{tg} \alpha) + (\operatorname{tg} \alpha + \mu_1)(1 - \mu_2 \operatorname{tg} \alpha) \right]}$$

или

$$\int_0^{\omega_0} d\omega = \frac{2}{R} \int_0^t \frac{g(2\mu_1\mu_2 + (\mu_1 + \mu_2)\operatorname{tg} \alpha) dt}{\cos \alpha \left[ (\mu_2 \operatorname{tg} \alpha + 1)(\mu_2 - \operatorname{tg} \alpha) + (\operatorname{tg} \alpha + \mu_1)(1 - \mu_2 \operatorname{tg} \alpha) \right]}. \quad (6)$$

Проинтегрировав формулу (6), получим:

$$\omega_0 = \frac{2g(2\mu_1\mu_2 + (\mu_1 + \mu_2)\operatorname{tg} \alpha)t}{R \cos \alpha \left[ (\mu_2 \operatorname{tg} \alpha + 1)(\mu_2 - \operatorname{tg} \alpha) + (\operatorname{tg} \alpha + \mu_1)(1 - \mu_2 \operatorname{tg} \alpha) \right]}. \quad (7)$$

С учетом принятых допущений линейная скорость точки ролика в месте его касания с диском является постоянной величиной  $v = \omega_1 r$  и равна линейной скорости вращения диска, тогда угловая скорость вращения диска:

$$\omega_0 = v / R = \omega_1 r / R, \quad (8)$$

где  $r$  – радиус ролика, м.

Из выражений (7), (8) получим время, в течение которого точка касания диска с роликом достигает линейной скорости ролика в точке его касания с диском:

$$t = \frac{\omega_1 r \cos \alpha \left[ (\mu_2 \operatorname{tg} \alpha + 1)(\mu_2 - \operatorname{tg} \alpha) + (\operatorname{tg} \alpha + \mu_1)(1 - \mu_2 \operatorname{tg} \alpha) \right]}{2g(2\mu_1\mu_2 + (\mu_1 + \mu_2)\operatorname{tg} \alpha)}.$$

В случае равенства коэффициентов  $\mu_1 = \mu_2 = \mu$  получим:

$$t = \frac{\omega_1 r \cos \alpha \left[ (\mu \operatorname{tg} \alpha + 1)(\mu - \operatorname{tg} \alpha) + (\operatorname{tg} \alpha + \mu)(1 - \mu \operatorname{tg} \alpha) \right]}{4g(\mu^2 + \mu \operatorname{tg} \alpha)}.$$

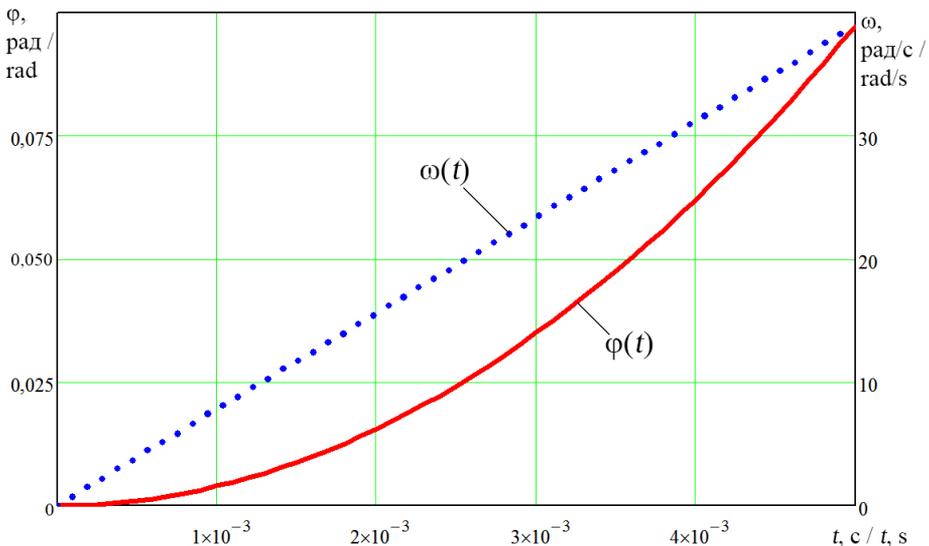
Коэффициент трения диска о вращающиеся обрешиненные ролики, принятый по усредненным данным, равен  $\mu = 0,51$ .

Используя обозначения, указанные на рисунке 4, выразим угол  $\alpha$ :

$$\alpha = \arcsin \frac{a}{2(R+r)}. \quad (9)$$

**Результаты исследования.** Рассмотрим вращение диска радиусом  $R = 0,027$  м (соответствует средним размерам клубня картофеля), находящегося на вращающихся роликах радиусом  $r = 0,04$  м с расстоянием между их центрами  $a = 0,09$  м. Примем одинаковой частоту вращения роликов  $4 \text{ с}^{-1}$ . Угол  $\alpha$  при указанных выше значениях конструктивных параметров  $\approx 42^\circ$ .

Изменения углового перемещения  $\varphi(t)$  и угловой скорости  $\omega(t)$  диска в зависимости от времени его нахождения на вращающихся роликах до достижения им линейной скорости вращения ролика приведены на рисунке 5.

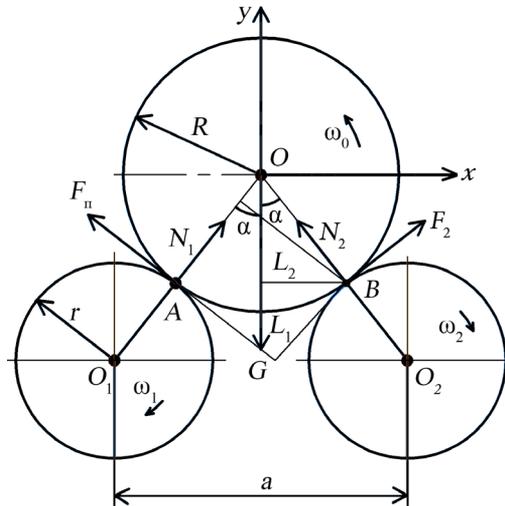


Р и с. 5. Зависимость углового перемещения  $\varphi(t)$  и угловой скорости  $\omega(t)$  диска, находящегося на вращающихся роликах

F i g. 5. Dependence of angular displacement  $\varphi(t)$  and angular velocity  $\omega(t)$  of a disk located on rotating rollers

Следовательно, точка на поверхности диска при отсутствии проскальзывания почти мгновенно приобретает скорость поверхности ролика.

Когда угловые скорости вращения роликов разные и  $\omega_1 \neq \omega_2$ , между одним из роликов и диском возникает проскальзывание (рис. 6).



Р и с. 6. Силы, действующие на диск при его нахождении на роликах, вращающихся с разными угловыми скоростями

Fig. 6. Forces acting on a disk when it is on rollers rotating at different angular velocities

Коэффициент трения диска о ролик при проскальзывании  $\mu_c = \mu_1$  зависит от угловой скорости вращения ролика и при снижении частоты вращения ролика  $\mu_c$  уменьшается. При повышении частоты вращения ролика коэффициент  $\mu_c$  возрастает, но при дальнейшем увеличении частоты  $\mu_c$  почти не изменяется.

При проскальзывании возникает сила трения между роликом и диском, создающая момент сил, заставляющий диск вращаться относительно точки касания диска со вторым роликом и перемещать его по второму ролику.

Из рисунка 6 следует, что сила трения ролика о ролик  $F_n$  в точке A создает момент относительно точки B, который направлен по часовой стрелке:

$$M_1 = F_n l_1 = F_n (R - R \cos 2\alpha) = \mu_1 N_1 R (1 - \cos 2\alpha).$$

Сила тяжести  $G = mg$  создает момент, направленный против часовой стрелки относительно точки B:

$$M_2 = G l_2 = mg R \sin \alpha.$$

Чтобы диск перемещался по второму ролику, необходимо:  $M_1 > M_2$ .

Подставив значения  $M_1$  и  $M_2$ , получим:

$$\mu_1 N_1 R (1 - \cos 2\alpha) > mg R \sin \alpha. \quad (10)$$

Из неравенства (10) следует, что коэффициент трения должен удовлетворять условию:

$$\mu_1 > \frac{mgR \sin \alpha}{N_1 R (1 - \cos 2\alpha)}.$$

Учитывая условие, получим:

$$N_1 = \frac{mg}{\cos \alpha (2 + \mu)}.$$

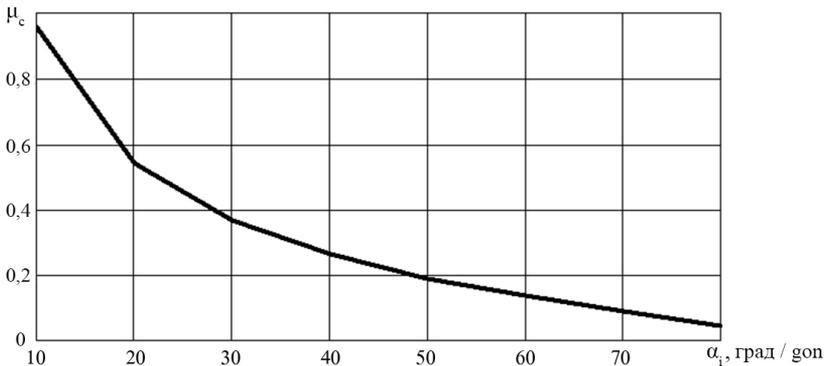
После подстановки получим следующее неравенство:

$$\mu_1 (2 + \mu_1) > \frac{\sin 2\alpha}{2(1 - \cos 2\alpha)}. \quad (11)$$

Решив неравенство (11) относительно  $\alpha$ , получим:

$$\alpha > \arctg \frac{1}{2\mu_1(\mu_1 + 2)}. \quad (12)$$

Изменение коэффициента трения скольжения на первом ролике в зависимости от угла  $\alpha$  приведено на рисунке 7.



Р и с. 7. Зависимость коэффициента трения скольжения от угла  $\alpha$   
 F i g. 7. Dependence of the coefficient of sliding friction on the angle  $\alpha$

Однако коэффициент трения скольжения  $\mu$  зависит еще и от линейной скорости поверхности ролика, с которой соприкасается клубень, поэтому характер изменения  $\mu$  при работе очистителя отличается от зависимости, приведенной на рисунке 7.

Приравняем между собой выражения (9) и (12) для случая, когда материал роликов одинаков, а коэффициенты трения клубней по ним равны между собой:

$$\arcsin \frac{a}{2(R+r)} = \arctg \frac{1}{2\mu(\mu+2)}. \quad (13)$$

Выразим из формулы (13) расстояние между центрами смежных роликов:

$$a = \frac{2(R+r)\text{sign}[\mu(\mu+2)]}{\sqrt{4\mu^4+16\mu^3+16\mu^2+1}}.$$

Так как коэффициент  $\mu$  всегда больше нуля, то  $\text{sign}[\mu(\mu+2)] = 1$ . С учетом этого можно записать:

$$a = \frac{2(R+r)}{\sqrt{4\mu^4+16\mu^3+16\mu^2+1}}.$$

Таким образом, при известных  $R$  ( $R = 25 \dots 84$  мм) и  $\mu$  ( $\mu = 0,42 \dots 0,59$ ), задавшись диаметром роликов, можно определить расстояние между центрами смежных роликов, которое является одним из основных параметров транспортирующе-очищающего рабочего органа. С учетом физико-механических свойств клубней картофеля и указанных выше аналитических выражений нами принято, что  $a = 0,09$  м.

**Обсуждение и заключение.** Чтобы момент силы трения при скольжении диска по первому ролику относительно точки касания диска со вторым роликом создавал условие перекатывания диска по второму ролику (и следующим за ним) необходимо выполнение неравенства (11). Выражение (13) показывает взаимосвязь между конструктивными параметрами предлагаемого устройства для очистки корнеплодов от загрязнений и физико-механическими свойствами очищаемых корнеплодов.

Проведенные исследования очистителя корнеплодов в лабораторных условиях, основанные на результатах теоретических исследований, показали, что при длине транспортирующе-очищающего рабочего органа 2 м за время 34,4 с можно достичь эффективности очистки  $\approx 78$  % при оснащении машины 16 роликами и соотношении частот вращения нечетных и четных роликов 220/250 мин<sup>-1</sup>. Большой эффективности очистки корнеплодов на жестких резиновых роликах достичь почти невозможно вследствие отклонения формы корнеплодов от идеальной и наличия на их поверхности выпуклостей и впадин, например, в виде глубоких глазков. При этом остаточная загрязненность корнеплодов не превышала 2,5 %, что полностью соответствует зоотехническим требованиям к их подготовке к скармливанию сельскохозяйственным животным.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Шамонин В.И., Сергеев А.В., Логинов Г.А. Обоснование режимов работы машины для мойки картофеля и корнеплодов. *Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета*. 2018;3(52):231–236. URL: <https://clck.ru/3GXMzk> (дата обращения: 27.09.2024). Shamonin V.I., Sergeev A.V., Loginov G.A. [Justification of the Operating Modes of the Machine for Washing Potatoes and Root Crops]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta*. 2018;3(52):231–236. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://clck.ru/3GXMzk> (accessed 27.09.2024).
2. Сабиев У.К., Хузин И.Р. Анализ машин для очистки корнеклубнеплодов. *Вестник Омского государственного аграрного университета*. 2020;2(38):188–195. EDN: RIQOUR Sabiev U.K., Khuzin I.R. Analysis of Root Lifters. *Vestnik Omskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta*. 2020;2(38):188–195. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: RIQOUR

3. Сабиев У.К., Хузин И.Р. Безводная очистка корнеклубнеплодов вибрационным воздействием. *Вестник Омского государственного аграрного университета*. 2020;4(40):146–151. URL: [https://www.omgau.ru/upload/iblock/b27/19\\_40.pdf](https://www.omgau.ru/upload/iblock/b27/19_40.pdf) (дата обращения: 27.09.2024). Sabiev U.K., Khuzin I.R. Waterless Tuberous Root Cleaning by Means of Vibration. *Vestnik Omskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta*. 2020;4(40):146–151. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: [https://www.omgau.ru/upload/iblock/b27/19\\_40.pdf](https://www.omgau.ru/upload/iblock/b27/19_40.pdf) (accessed 27.09.2024).
4. Дорохов А.С., Аксенов А.Г., Сибирёв А.В. Результаты исследований процесса очистки клубней картофеля и корнеплодов моркови с использованием ультразвука. *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*. 2020;2(50):6–14. <https://doi.org/10.18286/1816-4501-2020-2-6-14>  
Dorokhov A.S., Aksenov A.G., Sibirev A.V. Research Results of the Process of Cleaning Potato Tubers and Carrot Root Crops Using Ultrasound. *Vestnik of Ulyanovsk State Agricultural Academy*. 2020;2(50):6–14. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.18286/1816-4501-2020-2-6-14>
5. Джаббаров Н.И., Захаров А.М., Шаблыкин И.Н. Математическая модель и закономерности изменения производительности установки для предреализационной подготовки корнеплодов аэродинамическим способом. *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. 2023;16(1):69–79. EDN: EHEKTY  
Dzhabbarov N.I., Zakharov A.M., Shablykin I.N. Mathematical Model and Common Patterns of Performance Changes of the Device for Pre-Sale Preparation of Root Crops Through the use of Aerodynamic Method. *Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta*. 2023;16(1):69–79. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: EHEKTY
6. Дорохов А.С., Аксенов А.Г., Сибирев А.В., Мосяков М.А., Сазонов Н.В. Исследование сепарирующей системы с использованием теплоты отработавших газов двигателя свеклоуборочного комбайна. *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022;16(1):19–26. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-1-19-26>  
Dorokhov A.S., Aksenov A.G., Sibirev A.V., Mosyakov M.A., Sazonov N.V. Study of an Exhaust Gas Heat Separation System for the Beet Harvester. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2022;16(1):19–26. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-1-19-26>
7. Кухмазов К.З. Устройство для дополнительной очистки корнеплодов сахарной свеклы. *Нива Поволжья*. 2019;(2):122–128. EDN: XAAOMD  
Kukhmazov K.Z. Device for Additional Cleaning Root Crops of Sugar Beet. *Niva Povolzhya*. 2019;(2):122–128. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: XAAOMD
8. Филитова А.А., Бахарев А.А. Щеточное устройство для повышения эффективности механизированной очистки корнеплодов сахарной свеклы. *Инновации в сельском хозяйстве*. 2018;(3):541–547. EDN: YLTAEP  
Filitova A.A., Baharev A.A. Brush Device for Increasing the Efficiency of Mechanized Cleaning of Sugar Beet Roots. *Innovations in Agriculture*. 2018;(3):541–547. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: YLTAEP
9. Гайдай П.А. Сравнительный анализ устройств для безводной очистки корнеклубнеплодов. *Вестник Омского государственного аграрного университета*. 2015;(3):65–69. URL: [https://www.omgau.ru/upload/iblock/ebf/19\\_13.pdf](https://www.omgau.ru/upload/iblock/ebf/19_13.pdf) (дата обращения: 25.09.2024). Gayday P.A. Comparative Analysis Devices for Waterless Cleaning Root Crops. *Vestnik Omskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta*. 2015;(3):65–69. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: [https://www.omgau.ru/upload/iblock/ebf/19\\_13.pdf](https://www.omgau.ru/upload/iblock/ebf/19_13.pdf) (accessed 25.09.2024).
10. Шуханов С.Н. Повышение эффективности машин для сухой очистки корнеплодов. *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 2016;(2):13–14. EDN: LBCXUS  
Shukhanov S.N. Improving the Efficiency of Machines for Dry Cleaning of Root Crops. *Mechanization and Electrification of Agriculture*. 2016;(2):13–14. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: LBCXUS
11. Карпов В.В., Гулевский В.А. Анализ взаимодействия рабочих органов гофрощеточных барабанов очистителя кормовых корнеплодов с объектами очистки. *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. 2017;(2):121–128. <https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2017.2.121>

- Karpov V.V., Gulevsky V.A. Analysis of the Interaction of the Working Bodies of the Corrugated Brush Drums of the Cleaner of Forage Root Crops with the Cleaning Objects. *Bulletin of the Voronezh State Agrarian University*. 2017;(2):121–128. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2017.2.121>
12. Дорохов А.С., Аксенов А.Г., Сибирев А.В. Результаты поисковых исследований сепарирующей системы при очистке корнеплодов сахарной свеклы. *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*. 2021;(1):13–18. <https://doi.org/10.18286/1816-4501-2021-1-13-18>  
Dorokhov A.S., Aksenov A.G., Sibiryov A.V. Results of Exploratory Research of the Separating System when Cleaning Sugar Beet Root. *Vestnik of Ulyanovsk State Agricultural Academy*. 2021;(1):13–18. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.18286/1816-4501-2021-1-13-18>
  13. 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>
  14. 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.irjet.net/archives/V4/I10/IRJET-V4I101288.pdf> (accessed 25.09.2024).
  15. Захаров А.М. Разработка барабанно-роликового очистителя корнеклубнеплодов. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2019;6-1(84):44–47. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.84.6.008>  
Zakharov A.M. Development of Drum-Roller Tuberos Root Cleaner. *International Research Journal*. 2019;6-1(84):44–47. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.84.6.008>
  16. 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. URL: <https://www.vestnik-rsn.ru/vrsn/issue/view/61> (дата обращения: 27.09.2024).  
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.) Available at: <https://www.vestnik-rsn.ru/vrsn/issue/view/61> (accessed 27.09.2024).
  17. Курдюмов В.И., Павлушин А.А., Сутягин С.А., Сергеев А.В. Очиститель корнеплодов от почвы. Патент 187599 Российская Федерация. 13 марта 2019. EDN: RZLANW  
Kurdyumov V.I., Pavlushin A.A., Sutyagin S.A., Sergeev A.V. [Soil Remover for Root Crops]. Patent 187599 Russian Federation. 2019 March 13. (In Russ.) EDN: RZLANW
  18. Курдюмов В.И., Павлушин А.А., Сутягин С.А., Сергеев А.В. Очиститель корнеплодов от почвы. Патент 187652 Российская Федерация. 14 марта 2019. EDN: HGTWOT  
Kurdyumov V.I., Pavlushin A.A., Sutyagin S.A., Sergeev A.V. [Soil Remover for Root Crops]. Patent 187652 Russian Federation. 2019 March 14. (In Russ.) EDN: HGTWOT
  19. Курдюмов В.И., Павлушин А.А., Сутягин С.А., Сергеев А.В. Очиститель корнеплодов от почвы. Патент 2705308 Российская Федерация. 6 ноября 2019. EDN: CVQTHZ  
Kurdyumov V.I., Pavlushin A.A., Sutyagin S.A., Sergeev A.V. Root Crops Soil Cleaner. Patent 2705308 Russian Federation. 2019 November 6. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: CVQTHZ
  20. Курдюмов В.И., Павлушин А.А., Горельшев Е.М., Починов В.Д. Очиститель корнеплодов от почвы. Патент 200458 Российская Федерация. 26 октября 2020. EDN: JGBBQM  
Kurdyumov V.I., Pavlushin A.A., Gorelyshev E.M., Pochinov V.D. [Soil Remover for Root Crops]. Patent 200458 Russian Federation. 2020 October 26. (In Russ.) EDN: JGBBQM
  21. Mayer V., Vejchar D., Pastorková L. Measurement of Potato Tubers Resistance Against Mechanical Loading. *Research in Agricultural Engineering*. 2008;54(1):22–31. <https://doi.org/10.17221/708-RAE>
  22. Крючкова Л.Г., Доценко С.М., Бурмага А.В., Винокуров С.А., Гончарук О.В. Обоснование способа и параметров процесса сухой очистки корнеплодов для линии приготовления и раздачи кормовых смесей. *АгроЭкоИнфо*. 2017;(3):11. EDN: ZSGMUD

Kryuchkova L.G., Dotsenko S.M., Burmaga A.V., Vinokurov S.A., Goncharuk O.V. [Justification of the Method and Parameters of the Dry Cleaning Process of Root Crops for the Line for the Preparation and Distribution of Feed Mixtures]. *AgroEcolInfo*. 2017;(3):11. (In Russ.) EDN: ZSGMUD

*Об авторах:*

**Курдюмов Владимир Иванович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой агротехнологий, машин и безопасности жизнедеятельности Ульяновского государственного аграрного университета имени П. А. Столыпина (432017, Российская Федерация, г. Ульяновск, б-р Новый Венец, 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1603-1779>, Researcher ID: F-3816-2019, Scopus ID: 57188840075, SPIN-код: 2823-4234, vova73ulgau@yandex.ru

**Исаев Юрий Михайлович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой математики и физики Ульяновского государственного аграрного университета имени П. А. Столыпина (432017, Российская Федерация, г. Ульяновск, б-р Новый Венец, 1), ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6969-8533>, Scopus ID: 57201581226, SPIN-код: 8845-9914, isurmi@yandex.ru

**Павлушин Андрей Александрович**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры агротехнологий, машин и безопасности жизнедеятельности Ульяновского государственного аграрного университета имени П. А. Столыпина (432017, Российская Федерация, г. Ульяновск, б-р Новый Венец, 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7678-2876>, Researcher ID: O-6051-2017, Scopus ID: 57142406500, SPIN-код: 6080-3209, andrejpavlu@yandex.ru

**Горельшев Егор Михайлович**, инженер первой категории кафедры безопасности жизнедеятельности и энергетики Ульяновского государственного аграрного университета имени П. А. Столыпина (432017, Российская Федерация, г. Ульяновск, б-р Новый Венец, 1), ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0974-3879>, SPIN-код: 2859-5060, Acrobat1997@rambler.ru

*Заявленный вклад авторов:*

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

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

А. А. Павлушин – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор данных; создание и подготовка рукописи: написание черновика рукописи, включая его перевод на иностранный язык.

Е. М. Горельшев – 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 06.12.2024; поступила после рецензирования 25.12.2024;  
принята к публикации 13.01.2025*

*About the authors:*

**Vladimir I. Kurdyumov**, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Agricultural Technologies, Machines and Life Safety, Ulyanovsk State Agrarian University named after P. A. Stolypin (1, Novy Venets Blvd, Ulyanovsk 432017, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1603-1779>, Researcher ID: F-3816-2019, Scopus ID: 57188840075, SPIN-code: 2823-4234, vova73ulgau@yandex.ru

**Yuri M. Isaev**, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Mathematics and Physics, Ulyanovsk State Agrarian University named after P. A. Stolypin (1, Novy Venets Blvd, Ulyanovsk 432017, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6969-8533>, Scopus ID: 57201581226, SPIN-code: 8845-9914, isurmi@yandex.ru

*Technologies, machinery and equipment*

**Andrey A. Pavlushin**, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Agricultural Technologies, Machines and Life Safety, Ulyanovsk State Agrarian University named after P. A. Stolypin (1, Novy Venets Blvd, Ulyanovsk 432017, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7678-2876>, Researcher ID: O-6051-2017, Scopus ID: 57142406500, SPIN-code: 6080-3209, [andrejpavlu@yandex.ru](mailto:andrejpavlu@yandex.ru)

**Egor M. Gorelyshev**, Engineer of the First Category of the Department of Life Safety and Energy, Ulyanovsk State Agrarian University named after P. A. Stolypin (1, Novy Venets Blvd, Ulyanovsk 432017, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0974-3879>, SPIN-code: 2859-5060, [Acrobat1997@rambler.ru](mailto:Acrobat1997@rambler.ru)

*Authors contribution:*

V. I. Kurdyumov – formulating the idea, objectives and aims of the study; preparing the manuscript: critical analysis of the draft manuscript, making comments and corrections by members of the research team including at the pre- and post-publication stages.

Yu. M. Isaev – conducting the study, specifically performing the experiments and collecting data; preparing the manuscript, specifically visualizing the study results and the data obtained.

A. A. Pavlushin – conducting the study including performing the experiments and collecting data; preparing the manuscript, specifically writing the draft manuscript including its translation into a foreign language.

E. M. Gorelyshev – 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 06.12.2024; revised 25.12.2024; accepted 13.01.2025*

## ТРЕНИЕ И ИЗНОС В МАШИНАХ / FRICTION AND WEAR IN MACHINES



<https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202501.155-169>

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

УДК 621.785:631.312.021.3

ISSN Print 2658-4123

ISSN Online 2658-6525

<https://vestnik.mrsu.ru>

*Оригинальная статья / Original article*



### Применение эпоксидно-гравийных композитов для упрочнения составных лемехов с возможностью устранения лучевидного износа

И. Н. Кравченко<sup>1,2✉</sup>, С. А. Феськов<sup>3</sup>, П. В. Сенин<sup>4</sup>,  
П. В. Чумаков<sup>4</sup>, А. А. Гуцан<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Институт машиноведения имени А. А. Благодирова  
Российской академии наук  
(г. Москва, Российская Федерация)*

<sup>2</sup> *Российский государственный аграрный университет –  
МСХА имени К. А. Тимирязева  
(г. Москва, Российская Федерация)*

<sup>3</sup> *Брянский государственный аграрный университет  
(г. Брянск, Российская Федерация)*

<sup>4</sup> *Национальный исследовательский Мордовский  
государственный университет  
(г. Саранск, Российская Федерация)*

✉ [kravchenko-in71@yandex.ru](mailto:kravchenko-in71@yandex.ru)

#### Аннотация

**Введение.** Стойкость деталей почвообрабатывающей техники к абразивному износу является важнейшей эксплуатационной характеристикой. Применение различных способов упрочнения поверхностей деталей почвообрабатывающей техники является важной задачей сельскохозяйственного машиностроения. Статья посвящена исследованию эффективности применения эпоксидно-гравийных композитов для упрочнения составных лемехов, работающих в условиях повышенного абразивного износа.

**Цель исследования.** Обосновать практическое применение эпоксидно-гравийных композитов для упрочнения составных лемехов с возможностью устранения лучевидного износа.

**Материалы и методы.** В рамках исследования для восстановления изношенных лемехов оборотного плуга производства компании «Квернеланд Групп», агрегированного с трактором «Кировец К-744», использовались покрытия на основе эпоксидного композита с гравийной крошкой различных фракций, в которых соотношение эпоксидного компаунда к гравийному наполнителю составляло 50:50. В процессе эксплуатации машинотракторного агрегата осуществлялся контроль динамики износа восстановленных лемехов. Исследуемые лемехи различались между собой фракцией гравийной крошки в эпоксидном композите. Для каждого лемеха строились зависимости динамики износа от наработки.

© Кравченко И. Н., Феськов С. А., Сенин П. В., Чумаков П. В., Гуцан А. А., 2025



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

*Результаты исследования.* Применение гравийной крошки с дисперсностью гравийных частиц 1,75 мм в эпоксидной смоле показало наилучшую стойкость к абразивному износу. Оптимальные эксплуатационные характеристики композита обусловлены высокой адгезией частиц к эпоксидной основе, что предотвращает их расслоение и обеспечивает устойчивость покрытия при механических и ударных нагрузках. Это доказывает эффективность применения эпоксидно-гравийных композитов для упрочнения рабочих поверхностей лемехов, что в условиях абразивного изнашивания приводит к снижению вероятности образования лучевого износа. *Обсуждение и заключение.* Проведенные исследования подтверждают, что применение эпоксидно-гравийных композитов позволяет повысить износостойкость покрытий в 2,8 раза по сравнению с деталями заводского изготовления. Это приведет к увеличению ресурса лемехов, работающих в условиях интенсивного абразивного трения. Применение эпоксидно-гравийных композитов при упрочнении лемехов актуально для сельскохозяйственных предприятий ввиду высокого ресурса упрочненных поверхностей в процессе их эксплуатации.

**Ключевые слова:** эпоксидно-гравийный композит, составные лемехи, абразивный износ, адгезионная прочность, упрочняющее покрытие, эксплуатационный ресурс, лучевидный износ

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

**Для цитирования:** Кравченко И.Н., Феськов С.А., Сенин П.В., Чумаков П.В., Гуцан А.А. Применение эпоксидно-гравийных композитов для упрочнения составных лемехов с возможностью устранения лучевидного износа. *Инженерные технологии и системы*. 2025;35(1):155–169. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202501.155-169>

## The use of Epoxy-Gravel Composites to Harden Composite Ploughshares with the Possibility of Restoring the Components Having Radial Wear

I. N. Kravchenko<sup>a,b✉</sup>, S. A. Feskov<sup>c</sup>, P. V. Senin<sup>d</sup>,  
P. V. Chumakov<sup>d</sup>, A. A. Gutsan<sup>c</sup>

<sup>a</sup> *Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)*

<sup>b</sup> *Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, Russian Federation)*

<sup>c</sup> *Bryansk State Agrarian University (Bryansk, Russian Federation)*

<sup>d</sup> *National Research Mordovia State University (Saransk, Russian Federation)*

✉ [kravchenko-in71@yandex.ru](mailto:kravchenko-in71@yandex.ru)

### Abstract

*Introduction.* The resistance of soil cultivation equipment components to abrasive wear is an important operational characteristic. Employing various methods to harden the surfaces of these components is an important task for agricultural machinery manufacturing. This article focuses on studying the effectiveness of using epoxy-gravel composites to harden composite ploughshares operating under conditions causing increased abrasive wear.

*Aim of the Study.* The study is aimed at substantiating the practical application of epoxy-gravel composites to harden composite ploughshares with the ability to restore the components having radial wear.

*Materials and Methods.* Within the framework of the study on restoring worn ploughshares of the reversible plough produced by “Kverneland Group” company and aggregated with the tractor “Kirovets K-744”, there were used coatings based on epoxy composite with gravel crumbs of different fractions, in which the ratio of epoxy compound to gravel filler was 50:50. During the machine-tractor unit operation, there was monitored the wear dynamics of the restored ploughshares. The ploughshares under study differed among themselves by the fraction of gravel crumbs in the epoxy composite. For each ploughshare under study, there were plotted the dependence of wear dynamics on operating time.

*Results.* The use of gravel chips with a dispersion of gravel particles of 1.75 mm in epoxy resin has shown the best resistance to abrasive wear. The optimal operational characteristics of the composite derive from the high adhesion of the particles to the epoxy base that prevents their delamination and provides the stability of the coating under mechanical and shock loads. This proves the effectiveness of using epoxy-gravel composites to harden the working surfaces of ploughshares that in the conditions of abrasive wear reduce the probability of radial wear.

*Discussion and Conclusion.* The conducted studies confirm that the use of epoxy-gravel composites makes it possible to increase the wear resistance of coatings by 2.8 times compared with factory-made parts. This allows increasing the service life of ploughshares operating under conditions of intense abrasive friction. The use of epoxy-gravel composites to harden ploughshares is important for agricultural enterprises, because of the high resource of hardened surfaces during their operation.

**Keywords:** epoxy-gravel composite, composite ploughshares, abrasive wear, adhesive strength, hardening coating, operational life, radial wear

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

**Acknowledgements:** The authors express their gratitude to anonymous reviewers, whose objective comments contributed to improving the quality of the article.

**For citation:** Kravchenko I.N., Feskov S.A., Senin P.V., Chumakov P.V., Gutsan A.A. The use of Epoxy-Gravel Composites to Harden Composite Ploughshares with the Possibility of Restoring the Components Having Radial Wear. *Engineering Technologies and Systems*. 2025;35(1):155–169. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202501.155-169>

**Введение.** Ключевую роль в технологических процессах обработки почвы играют эксплуатационные характеристики рабочих поверхностей деталей почвообрабатывающих машин [1; 2]. Повышение указанных характеристик, особенно в части их стойкости к абразивному износу, является важной задачей сельскохозяйственного машиностроения [3–5]. В работах [6–8] представлен подробный анализ перспективных способов упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин, направленных на улучшение эксплуатационных характеристик поверхностей, подвергающихся воздействию абразивных сред. Особое внимание уделяется методам нанесения защитных покрытий и созданию материалов, повышающих износостойкость [9–11].

В последние годы в технической литературе все больше внимания уделяется использованию современных материалов с высокими антиабразивными свойствами для восстановления и упрочнения рабочих поверхностей деталей сельскохозяйственных орудий<sup>1</sup> [12]. При этом особый интерес представляют композиты на основе эпоксидного компаунда с добавлением дисперсного наполнителя природного

<sup>1</sup> Новиков В. С. Обеспечение долговечности рабочих органов почвообрабатывающих машин : моногр. М. : ИНФРА-М, 2019. 155 с.

происхождения, например, гравийной крошки [13]. Исследования показывают, что такие материалы имеют высокий потенциал для использования в почвенных условиях. Однако эксперименты проводились на отвалах плужных корпусов, а эти детали испытывают наименьшую нагрузку по сравнению с лемехами [14; 15].

Применимость таких покрытий для деталей, работающих при высоких нагрузках и в условиях значительного абразивного износа, требует дальнейших исследований. Кроме того, возникла необходимость в разработке методов, обеспечивающих более надежную адгезию полимерных покрытий с металлическими подложками, что имеет решающее значение для обеспечения долговечности восстановленных поверхностей в процессе их эксплуатации. При этом важным остается вопрос о размере частиц композитного наполнителя. Такие данные можно получить только путем натурных испытаний в конкретных рабочих органах почвообрабатывающих машин.

Целью исследования является обоснование возможности устранения лучевидного износа и упрочнения лемехов почвообрабатывающих машин нанесением на рабочие поверхности эпоксидно-гравийных композитов.

**Обзор литературы.** Восстановление изношенных деталей с использованием полимерных покрытий становится все более востребованной технологией в различных отраслях народного хозяйства [16–18]. Полимерные покрытия обладают рядом преимуществ, таких как высокая износостойкость, коррозионная стойкость, устойчивость к агрессивным средам и возможность использования на сложных геометрических поверхностях, что позволяет более эффективно решать вопросы продления срока службы деталей, особенно в условиях повышенных эксплуатационных нагрузок [19; 20].

Влияние размера частиц песка в эпоксидно-песчаных композитах на их стойкость к абразивному износу исследовано в работе [21]. Авторы определяют оптимальные параметры повышения износостойкости композитов. Наибольшая износостойкость достигается при использовании песчаных частиц диаметром 1 мм. С увеличением размера песчаных частиц интенсивность изнашивания уменьшается, однако при использовании более крупных частиц этот эффект нейтрализуется за счет их вырывания из матрицы.

Разработаны и обоснованы критерии оценки эксплуатационной и экономической эффективности применения эпоксидно-песчаных композитов с различным содержанием песчаного наполнителя при упрочнении деталей почвообрабатывающих машин. Такие критерии позволяют определить целесообразность применения износостойких покрытий [22].

Согласно результатам исследований, представленных в источнике [23], качественные характеристики полимерных покрытий (уменьшение размера и снижение концентрации пор, уменьшение площади) достигают наибольших значений при замене операции ручного перемешивания полимерного композиционного материала на ультразвуковую обработку раствора. Это достигается за счет уменьшения размеров (до 2 раз) и концентрации (до 30 %) пор. Также более чем в 1,36 раза происходит снижение площади разрушенного покрытия. В связи с этим, ресурс корпусных деталей повышается в 1,45 раза за счет применения эластомера Ф-40 после ультразвуковой обработки.

В материалах статьи [24] представлена методика расчета точностных характеристик технологического оборудования при восстановлении посадок подшипников качения в узлах транспортных средств адгезивами.

Изучено взаимодействие эластомера Ф-40 с наночастицами меди и алюминия [25]. Наполнение эластомера Ф-40 такими наночастицами обеспечивает повышение модуля упругости, прочности и долговечности материала, а также повышает его термостойкость и теплопроводность. Это позволяет значительно увеличить теплоотвод от деталей восстановленного узла.

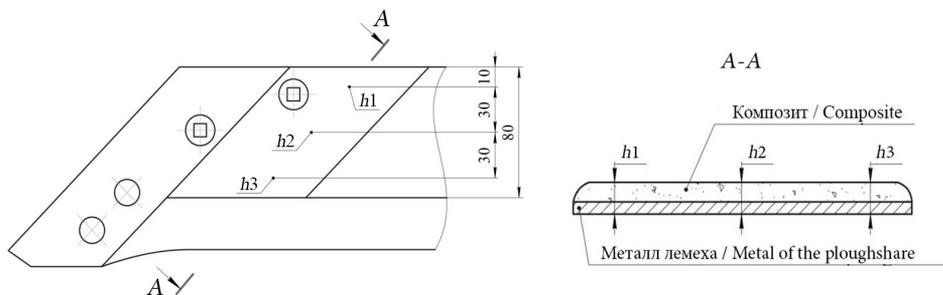
Определен оптимальный состав нанокompозита, при котором материал имеет наиболее высокие механические свойства: эластомер Ф-40 – 100 мас. ч., алюминиевый нанопорошок – 2,0 мас. ч. и медный нанопорошок – 1,6 мас. ч.

Предложенные композиционные покрытия, включающие эпоксидно-песчаные композиты и материалы на основе эластомера Ф-40 с нанонаполнителями, показывают высокую перспективность для восстановления и упрочнения деталей в условиях интенсивного износа. Их применение позволяет существенно повысить износостойкость, ресурс и устойчивость к воздействию агрессивных сред, что делает их эффективным решением для продления срока службы деталей.

Однако необходимы дальнейшие исследования, направленные на оптимизацию состава композитов, анализ адгезионных свойств покрытий, а также изучение их поведения в различных эксплуатационных условиях на конкретных деталях.

**Материалы и методы.** В ходе проведения полевых испытаний контролю подвергались опытные образцы составных лемехов компании «Квернеланд Групп» с восстановленной режуще-лезвийной частью, применением термо-компенсирующего элемента (ТКЭ) и упрочненной областью наиболее вероятного образования лучевидного износа (рис. 1) эпоксидно-гравийными композитами (ЭГК). Лучевидный износ – один из видов непрофильного износа, который определяется веерной траекторией движения почвенной среды, а глубина и ширина – одновременным изменением движения и абразивности грунта при перемещении от нижней части лемеха к верхней.

Измерения толщин покрытия контролировалось в трех точках  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $h_3$  (рис. 1).



Р и с. 1. Схема измерения лучевидного износа по толщине (арабскими цифрами отмечены точки измерений)

F i g. 1. Diagram of measuring radial wear by thickness (measurement points are marked with Arabic numerals)

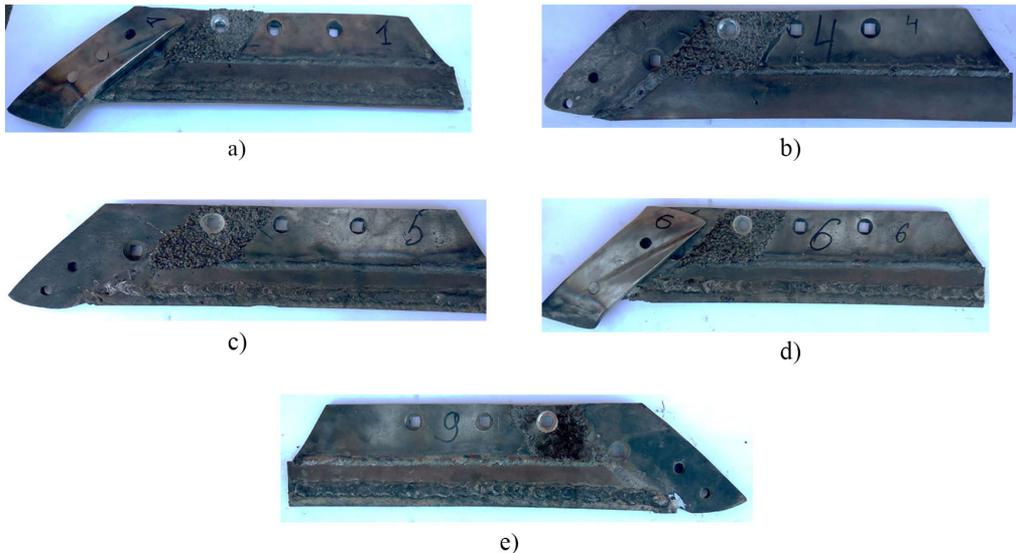
Источник: составлено авторами статьи.

Source: compiled by the authors of the article.

Упрочняющее покрытие представляет собой состав с соотношением эпоксидного компаунда (Э) и гравийного компонента (Г) для всех испытуемых образцов: Э/Г = 50/50. Отличительной особенностью опытных лемехов является применение гравийного наполнителя определенной дисперсностью. Наполнителем выступает гравийная крошка различной фракции: 3–2,5 мм; 2,5–2 мм; 2–1,5 мм; 1,5–1 мм; 1–0,5 мм (рис. 2).

Контроль динамики износа ( $\Delta h$ ) осуществлялся в зависимости от наработки детали.

Испытания проводились на супесчаных почвах с использованием восьмикорпусного оборотного плуга производства компании «Квернеланд Групп», агрегированного с трактором «Кировец К-744».



Р и с. 2. Восстановленные остовы лемехов компании «Квернеланд Групп» с использованием эпоксидно-гравийных композитов состава 50/50:

а) 3–2,5 мм; б) 2,5–2 мм; в) 2–1,5 мм; г) 1,5–1 мм; е) 1–0,5 мм

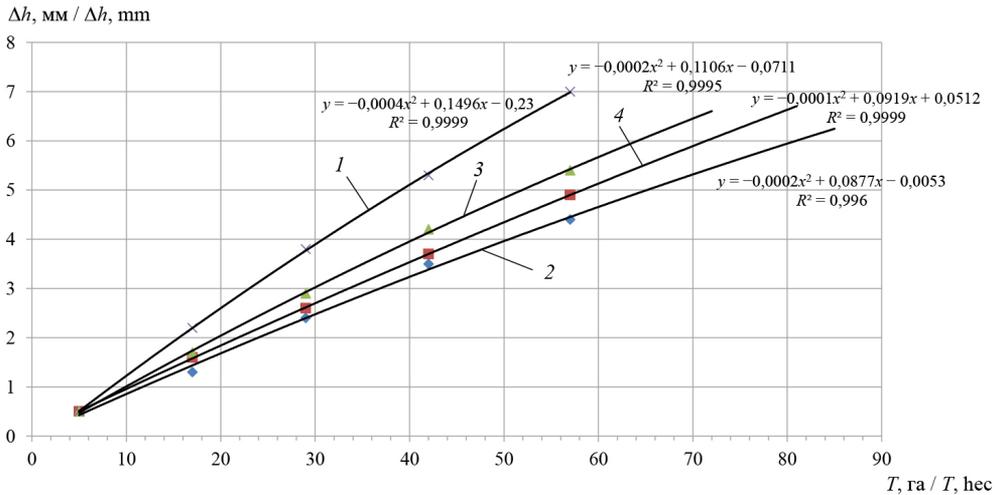
F i g. 2. The restored frames of the ploughshares of the “Kverneland Group company” using epoxy-gravel composites of composition 50/50:

а) 3–2,5 mm; б) 2,5–2 mm; в) 2–1,5 mm; г) 1,5–1 mm; е) 1–0,5 mm

*Источник:* фотографии сделаны П. В. Чумаковым после нанесения эпоксидно-гравийных композитов перед проведением полевых испытаний в 2024 году.

*Source:* the photos were taken by P. V. Chumakov after applying epoxy-gravel composites before conducting field tests in 2024.

**Результаты исследования.** Результаты испытаний, представленные на рисунке 3, показали прямо пропорциональное увеличение износа  $\Delta h$  от наработки  $T$ . Это связано с однородностью механизма абразивного изнашивания независимо от способа упрочнения [15; 26].



Р и с. 3. Изменение толщины упроченной области ЭГК от наработки:

1 –  $d_e = 1,25$  мм; 2 –  $d_e = 1,75$  мм; 3 –  $d_e = 2,25$  мм; 4 –  $d_e = 2,75$  мм

F i g. 3. Change in the thickness of the hardened area of the EGC from operating time:

1 –  $d_e = 1,25$  мм; 2 –  $d_e = 1,75$  мм; 3 –  $d_e = 2,25$  мм; 4 –  $d_e = 2,75$  мм

*Источник:* здесь и далее рисунки составлены авторами статьи по результатам полевых испытаний и измерения лучевидного износа по толщине.

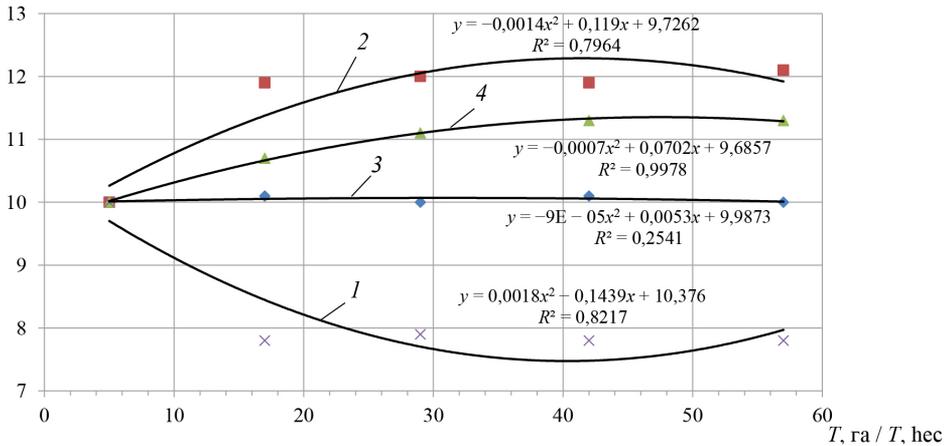
*Source:* hereinafter in this article the diagrams are compiled by the authors of the article based on the results of field tests and measurements of radial wear by thickness.

Исследования показывают, что максимальное значение износа  $\Delta h$  достигается при дисперсности частиц  $d_e$ , равной 1,25 мм. На этом уровне наработка материала составляет чуть менее 60 га. Это свидетельствует о том, что при оптимальной дисперсности частиц материал способен выдерживать значительные нагрузки и демонстрировать высокую износостойкость.

Однако при увеличении размера частиц до 1,75 мм наблюдается максимальное значение абразивной износостойкости. Это говорит о том, что более крупные частицы могут обеспечивать лучшую защиту от абразивного износа, что делает их предпочтительными для определенных условий эксплуатации. Частицы диаметром 2,75 мм имеют близкие к частицам размером 1,75 мм свойства, несмотря на их большую дисперсность. Это может быть связано с тем, что они обладают высокими показателями адгезионной прочности и износостойкости, что делает их эффективными в сложных условиях.

Графики (рис. 4) демонстрируют, что поведение композитов с различной дисперсностью частиц неодинаково. Это может быть объяснено тем, что трибологические свойства материалов зависят не только от размера частиц, но и от их распределения, формы и взаимодействия между собой. Например, более мелкие частицы могут создавать более плотную структуру, что снижает вероятность образования трещин и других дефектов, в то время как крупные частицы способствуют образованию более прочных связей между компонентами композита.

с, га/мм / с, нс/мм



Р и с. 4. Изменение стойкости к абразивному изнашиванию от наработки (цифровые обозначения соответствуют цифровой информации, представленной на рисунке 3)

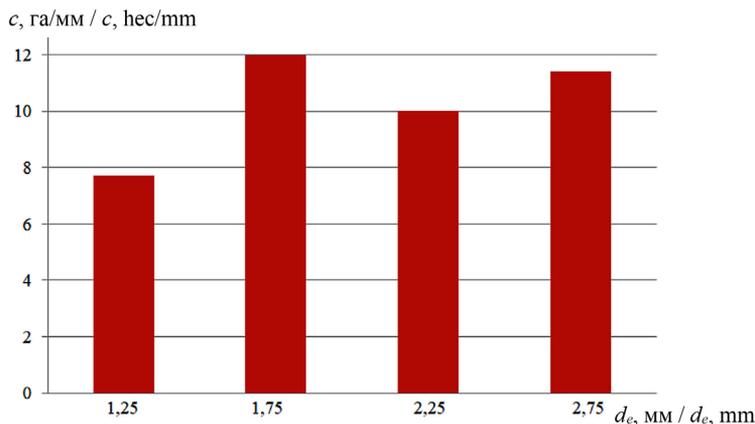
F i g. 4. Change in abrasive wear resistance with operating time (digital symbols correspond to the digital information presented in Figure 3)

Согласно данным, представленным в виде диаграмм на рисунке 5, лемеха с покрытиями, содержащими частицы диаметром 1,75 мм, демонстрируют максимальную стойкость к абразивному изнашиванию, достигающую 12 га/мм. Это говорит о том, что такие покрытия способны эффективно противостоять износу, что является критически важным для работы в условиях интенсивной эксплуатации.

С другой стороны, лемеха с покрытиями, имеющими дисперсность частиц  $d_e = 1,25$  мм, показывают минимальные значения стойкости к абразивному изнашиванию. Это подчеркивает важность выбора правильного размера частиц для достижения оптимальных эксплуатационных характеристик. Более крупные частицы, как правило, обеспечивают лучшую защиту от износа, что делает их предпочтительными для использования в тех условиях, где лемеха подвергаются значительным механическим нагрузкам.

Одним из наиболее впечатляющих результатов исследований является то, что применение композитов любого состава позволяет увеличить срок службы лемеха до потери им работоспособности по причине утраты толщины остова в области образования лучевидного износа в пределах 55–85 га. Это значительно превышает показатели, характерные для лемехов отечественного производства (цельнометаллические лемеха), которые, как правило, служат только до 5 смен.

Возможность использования предлагаемого лемеха позволит достичь наработки в пределах 55–85 га в расчете на одну деталь, тем самым продлив не только срок службы изделия, но и количество рабочих смен. Это позволит снизить затраты на замену и обслуживание, а также даст возможность аграриям планировать свою работу более эффективно.



Р и с. 5. Диаграммы износов соответственно средним размерам частиц наполнителя  $d_e$   
 F i g. 5. Wear diagrams according to the average particle sizes of the filler  $d_e$

Результаты исследования наработки упрочненной области лемеха в зависимости от дисперсности наполнителя эпоксидно-гравийных композитов представлены в таблице.

Т а б л и ц а  
 T a b l e

**Наработка упрочненной области лемеха в зависимости от дисперсности наполнителя**  
**Development of the hardened area of the ploughshare depending on the dispersion of the filler**

Дисперсность $d_e$ / Dispersion $d_e$	$T$ , га / $T$ , hec
В заводском исполнении / In the factory version	42
$d_e = 1-1,5$ мм / $d_e = 1-1.5$ mm	55
$d_e = 1,5-2$ мм / $d_e = 1.5-2$ mm	85
$d_e = 2-2,5$ мм / $d_e = 2-2.5$ mm	72
$d_e = 2,25-3$ мм / $d_e = 2.25-3$ mm	81

Выявленные закономерности влияния наработки на величину износа в зависимости от размера гравийной составляющей отражают комплексное влияние физических свойств композита на износостойкость и устойчивость покрытия (табл.), что подчеркивает важность тщательного подбора состава и структуры материала в зависимости от условий эксплуатации.

**Обсуждение и заключение.** Лемехи, восстановленные методом ТКЭ, имеют меньшую износостойкость и, соответственно, меньший ресурс по сравнению с новыми. Одним из ключевых преимуществ данной конструкции является ее способность предотвращать образование лучевидного износа, что повышает эффективность работы лемеха при вспашке абразивных почв, таких как супесь. Хотя повышение твердости до 53 HRC существенно повышает износостойкость [27; 28], широкое внедрение этой технологии ограничено из-за дополнительных затрат, необходимых для реализации термической обработки. Нельзя также не упомянуть

о возможности разрушения детали под воздействием ударных нагрузок, возникающих в процессе эксплуатации.

В производственных условиях для изготовления ТКЭ часто используют выбракованные рессорные листы, утратившие эксплуатационные свойства, но сохранившие твердость не менее 45 HRC. В связи со сложностью проведения дополнительной термообработки представляется целесообразным включение технологической операции нанесения абразивостойкого покрытия на основе эпоксидно-гравийного композита. Данное покрытие позволяет эффективно компенсировать недостаточную твердость восстановленных участков, повышая их износостойкость в условиях интенсивного абразивного воздействия. Износостойкость деталей с экспериментальными покрытиями оказалась в 1,4–1,9 раза выше по сравнению с изделиями без покрытия.

Ключевым фактором повышения износостойкости системы «частица – эпоксидный состав» является прочная адгезия между частицами и полимерной матрицей. Высокая степень смачивания частиц эпоксидной композицией способствует их надежному закреплению в матрице, что значительно повышает стойкость материала к абразивному износу. Такой подход позволяет удерживать абразивные частицы на рабочей поверхности в течение длительного времени, обеспечивая стабильную защиту от износа в условиях интенсивного трения. Хорошие адгезионные свойства также снижают вероятность отделения гравийных частиц под действием контактного напряжения и ударных нагрузок. Однако эффективность увеличения площади сцепления ограничивается размером частиц, что приводит к выравниванию адгезии и, соответственно, износостойкости композита.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Доказана эффективность использования эпоксидно-гравийных композитов в качестве упрочняющих покрытий для лемехов, работающих в условиях интенсивного абразивного воздействия почвенной среды.

2. Наибольшая стойкость к абразивному износу зафиксирована при применении состава эпоксидной смолы и гравийного наполнителя в соотношении 50:50, с дисперсностью гравийных частиц около 1,75 мм, позволяющая увеличить срок службы лемехов в 1,8 раза по сравнению с заводскими изделиями. Применение такого покрытия снижает вероятность образования лучевого износа, что продлевает срок службы деталей.

3. Внедрение эпоксидно-гравийных композитов для упрочнения составных лемехов представляется перспективным направлением, обеспечивающим экономическую и технологическую целесообразность. Результаты исследований являются основой для дальнейшего развития технологии и ее адаптации к другим типам почвообрабатывающих орудий.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Сидоров С.А., Зволинский В.Н. Повышение прочностных характеристик рабочих органов почвообрабатывающих машин путем защиты определенных зон от интенсивного абразивного изнашивания. *Технический сервис машин*. 2019;(1):179–193. EDN: EPBXHL

- Sidorov S.A., Zvolinsky V.N. Improving the Strength Characteristics of the Working Bodies of Tillage Machines by Protecting Certain Areas from Intense Abrasive Wears. *Technical Service of Machines*. 2019;(1):179–193. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: EPBXHL
2. Сидоров С.А., Миронов Д.А., Миронова А.В., Рябов В.В. Повышение износостойкости и других ресурсных характеристик материалов рабочих органов почвообрабатывающих машин. *Металлург*. 2021;(5):93–99. [https://doi.org/10.52351/00260827\\_2021\\_05\\_93](https://doi.org/10.52351/00260827_2021_05_93)  
Sidorov S.A., Mironov D.A., Mironova A.V., Ryabov V.V. Improving Wear Resistance and other Resource Characteristics of Materials of Working Bodies of Tillage Machines. *Metallurg*. 2021;(5):93–99. (In Russ., abstract in Eng.) [https://doi.org/10.52351/00260827\\_2021\\_05\\_93](https://doi.org/10.52351/00260827_2021_05_93)
  3. Лобачевский Я.П., Миронов Д.А., Миронова А.В. Основные направления повышения ресурса быстроизнашиваемых рабочих органов сельскохозяйственных машин. *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023;17(1):41–50. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-1-41-50>  
Lobachevsky Ya.P., Mironov D.A., Mironova A.V. Increasing the Operating Lifetime of Wearable Working Bodies of Agricultural Machines. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023;17(1):41–50. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-1-41-50>
  4. Величко С.А., Чумаков П.В., Коломейченко А.В. Оценка технического состояния силовых гидроцилиндров серии С навесных гидросистем тракторов. *Инженерные технологии и системы*. 2019;29(3):396–413. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201903.396-413>  
Velichko S.A., Chumakov P.V., Kolomeychenko A.V. Assessment of Technical Condition of C Series Power Hydraulic Cylinders of Mounted Hydraulic Systems of Tractors. *Engineering Technologies and Systems*. 2019;29(3):396–413. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201903.396-413>
  5. Чумаков П.В., Мартынов А.В., Коломейченко А.В., Хасан И.Х., Коломейченко А.С. Оценка технического состояния круглых шестеренных гидронасосов навесных гидросистем тракторов. *Инженерные технологии и системы*. 2020;30(3):426–447. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202003.426-447>  
Chumakov P.V., Martynov A.V., Kolomeychenko A.V., Hasan I.H., Kolomeychenko A.S. Evaluation of Technical Condition of Round Gear Hydraulic Pumps of Tractors Mounted Hydraulic Systems. *Engineering Technologies and Systems*. 2020;30(3):426–447. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202003.426-447>
  6. Титов Н.В., Коломейченко А.В., Виноградов В.В. Анализ перспективных способов упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин. *Техника и оборудование для села*. 2013;(10):33–36. EDN: REMCWH  
Titov N.V., Kolomeychenko A.V., Vinogradov V.V. Analysis of Promising Techniques of Hardening Working Bodies of Tillage Machines. *Machinery and Equipment for Rural Areas*. 2013;(10):33–36. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: REMCWH
  7. Добрин Д.А. Актуальные технологии упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин. *Технический сервис машин*. 2022;(4):111–117. <https://doi.org/10.22314/2618-8287-2022-60-4-111-117>  
Dobrin D.A. Relevant Hardening Technologies for Tillage Machines Work Tools. *Technical Service of Machines*. 2022;(4):111–117. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.22314/2618-8287-2022-60-4-111-117>
  8. Колосовский А.М., Рожков А.С., Ожегов Н.М., Черкасов В.Е. Упрочнение рабочих органов сельскохозяйственных машин. *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2023;6(362):43–51. <https://doi.org/10.33979/2073-7408-2023-362-6-43-51>  
Kolosovskii A.M., Rozhkov A.S., Ozhegov N.M., Cherkasov V.E. The Hardening of Agricultural Machines Working Bodies. *Fundamental'nye i Prikladnye Problemy Tekhniki i Tekhnologii*. 2023;6(362):43–51. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.33979/2073-7408-2023-362-6-43-51>

9. Xie Y.-J., Wang M.-C. Epitaxial MCrAlY Coating on a Ni-Base Superalloy Produced by Electrospark Deposition. *Surface and Coatings Technology*. 2006;201(6):3564–3570. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.08.107>
10. Yao J., Zhang Q., Liu R., Wu G. Laser Surface Hardening. *Laser Applications in Surface Modification*. 2022;65:83–102. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-8922-2\\_4](https://doi.org/10.1007/978-981-16-8922-2_4)
11. Khan A.U., Chatterjee S., Gopinath M., Madhukar Y.K. Continuous and Pulse TIG Arc Treatment for Surface Hardening of WAAM-MIG Parts. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2024;77:2163–2172. <https://doi.org/10.1007/s12666-024-03294-z>
12. Крюковская Н.С. Современные методы упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих орудий. *Труды ГОСНИТИ*. 2017;128:118–122. EDN: ZDRLMV  
Kryukovskaya N.S. Modern Methods of Hardening of Working Parts Tillage Tools. *Trudi GOSNITI*. 2017;128:118–122. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: ZDRLMV
13. Бирюлина Я.Ю., Михальченкова М.А. Применение абразивостойких эпоксидных композиций армированных дисперсными частицами из природных песков для восстановления деталей (отвалы и культиваторные лапы для высева семян). *Труды инженерно-технологического факультета Брянского государственного аграрного университета*. 2015;(1):77–93. EDN: YPBLTT  
Birulina Ya.Yu., Mikhalkhenkova M.A. Application of Abrasion Resistant Epoxy Compositions Reinforced with Dispersed Particles of Natural Sands for Parts Recovery (Blades and Cultivator Feet for Planting Seeds). *Trudy Inzhenerno-Tekhnologicheskogo Fakul'teta Bryanskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta*. 2015;(1):77–93. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: YPBLTT
14. Мостовой А.С., Панова Л.Г., Курбатова Е.А. Модификация эпоксидных полимеров кремний-содержащим наполнителем с целью повышения эксплуатационных свойств. *Вопросы материалообразования*. 2016;2(86):87–95. EDN: WDCAMP  
Mostovoy A.S., Panova L.G., Kurbatova E.A. Modification of Epoxy Polymers with a Silicon-Containing Filler in Order to Increase Operational Properties. *Voprosy Materialovedeniya*. 2016;2(86):87–95. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: WDCAMP
15. Михальченков А.М., Лушкина С.А., Михальченкова М.А. Восстановление деталей почвообрабатывающих машин абразивостойким дисперсионно-упрочненным композитом на основе эпоксидной смолы. *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2015;10(130):43–46. EDN: ULDXQV  
Mikhalkhenkov A.M., Lushkina S.A., Mikhalkhenkova M.A. [Restoration of Details of Tillage Machines with an Abrasive-Resistant Dispersion-Hardened Composite Based on Epoxy Resin]. *Hardening Technologies and Coatings*. 2015;10(130):43–46. (In Russ.) EDN: ULDXQV
16. Лесовик В.С., Федюк Р.С., Гридчин А.М., Мурали Г. Повышение эксплуатационных характеристик защитных композитов. *Строительные материалы*. 2021;(9):32–40. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-795-9-32-40>  
Lesovik V.S., Fediuk R.S., Gridchin A.M., Murali G. Improving the Operational Characteristics of Protective Composites. *Stroitel'nye Materialy*. 2021;(9):32–40. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-795-9-32-40>
17. Ямилинец С.Ю., Лозицкая А.В., Кондратов А.П. Физико-химическая стойкость и амортизирующие свойства полимерных композитов с защитной оболочкой. *Лакокрасочные материалы и их применение*. 2023;3(552):50–55. EDN: IPLIFG  
Yamilinets S.Yu., Lozitskaya A.V., Kondratov A.P. Physico-Chemical Resistance and Shock-Absorbing Properties of Polymer Composites with a Protective Shell. *Lakokrasochnie Materialy i Ikh Primenenie*. 2023;3(552):50–55. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: IPLIFG
18. Sharma S.D., Sowntharya L., Kar K.K. Polymer-Based Composite Structures: Processing and Applications. *Composite Materials*. 2017:1–36. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-49514-8\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-662-49514-8_1)
19. Münstedt H. Melt Strain Hardening of Polymeric Systems Filled with Solid Particles: Review and Supplementary Experimental Results. *Rheologica Acta*. 2024;63:333–343. <https://doi.org/10.1007/s00397-024-01452-0>

20. Wen J. Some Mechanical Properties of Typical Polymer-Based Composites. *Physical Properties of Polymers Handbook*. 2007:487–495. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-69002-5\\_28](https://doi.org/10.1007/978-0-387-69002-5_28)
21. Михальченко А.М., Комогорцев В.Ф., Филин Ю.И. Влияние дисперсности песка на абразивную износостойкость композита с эпоксидной основой. *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2017;(2):33–36. EDN: [XVSQZL](#)  
Mikhailchenkov A.M., Komogortsev V.F., Filin Yu.I. [The Effect of Sand Dispersion on the Abrasive wear Resistance of a Composite with an Epoxy Base]. *Vse Materialy. Enciklopedicheskij Spravochnik*. 2017;(2):33–36. (In Russ.) EDN: [XVSQZL](#)
22. Михальченко А.М., Ториков В.Е., Михальченкова М.А., Ульянова Н.Д. Критерии эксплуатационной и экономической оценки эффективности эпоксидно-песчаных композитов различных составов как абразивостойких покрытий деталей почвообрабатывающих орудий. *Клеи. Герметики. Технологии*. 2023;(1):35–39. EDN: [QODBPM](#)  
Mikhailchenkov A.M., Torikov V.E., Mikhailchenkova M.A., Ulyanova N.D. Criteria for Operational and Economic Evaluation of the Effectiveness of Epoxy-Sand Composites of Various Compositions as Abrasive-Resistant Coatings of Parts of Tillage Tools. *Glues. Sealants. Technologies*. 2023;(1):35–39. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: [QODBPM](#)
23. Ли Р.И., Колесников А.А. Повышение качества восстановления корпусных деталей автомобильной техники полимерными композитами, обработанными в ультразвуковом поле. *Мир транспорта и технологических машин*. 2017;1(56):16–21. EDN: [YHWVCN](#)  
Li R.I., Kolesnikov A.A. Improving Recovery Body Parts Automotive Engineering Polymer Composite, Processed in an Ultrasonic Field. *Mir Transporta i Tekhnologicheskikh Mashin*. 2017;1(56):16–21. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: [YHWVCN](#)
24. Ли Р.И., Малюгин В.А. Расчет точностных характеристик технологической оснастки при восстановлении посадок подшипников качения в узлах автомобилей адгезивами. *Наука в центральной России*. 2019;3(39):36–43. EDN: [SPZAHU](#)  
Li R.I., Malyugin V.A. Calculation of Precision Characteristics of the Industrial Equipment at Restoration of Landings of Rolling Bearings in Knots of Cars Adhesives. *Science in the Central Russia*. 2019;3(39):36–43. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: [SPZAHU](#)
25. Ли Р.И., Псарев Д.Н., Киба М.Р. Эластомерный нанокompозит для восстановления изношенных корпусных деталей автотракторной техники. *Наука в центральной России*. 2021;1(49):69–79. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2021-1-69-79>  
Li R.I., Psarev D.N., Kiba M.R. Elastomeric Nanocomposite for Restoration Worn-Out Body Parts Vehicles and Tractors. *Science in the Central Russia*. 2021;1(49):69–79. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2021-1-69-79>
26. Егунова Т.Н. Определение износостойкости эпоксидно-песчаных композитов, применяемых при ремонте машин. *Ремонт. Восстановление. Модернизация*. 2022;(10):35–39. EDN: [PSFAWJ](#)  
Egunova T.N. Determination of Wear Resistance of Epoxy-Sand Composites Used in the Repair of Machines. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizaciya*. 2022;(10):35–39. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: [PSFAWJ](#)
27. Михальченко А.М., Новиков А.А., Купреенко А.И. Изнашивание термоупрочненной стали 65Г в среде с незакрепленным абразивом. *Материаловедение*. 2017;(8):20–23. EDN: [ZDNMZL](#)  
Mikhailchenkov A.M., Novikov A.A., Kupreenko A.I. 65Г Thermostrengthened Steel Wearing in Medium with Loose Abrasive. *Materialovedenie*. 2017;(8):20–23. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: [ZDNMZL](#)
28. Михальченко А.М., Феськов С.А., Козарез И.В. Влияние концентрации и дисперсности наполнителя эпоксидно-гравийного композита на сопротивление контактному деформированию при внедрении твердого сферического тела. *Вестник машиностроения*. 2023;102(6):509–512. <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2023-102-6-509-512>

Mikhailchenkov A.M., Feskov S.A., Kozarez I.V. Influence of Concentration and Dispersion of Epoxy-Gravel Composite Filler on Resistance to Contact Deformation During the Introduction of a Solid Spherical Body. *Vestnik Mashinostroeniya*. 2023;102(6):509–512. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2023-102-6-509-512>

*Об авторах:*

**Кравченко Игорь Николаевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технического сервиса машин и оборудования Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К. А. Тимирязева (127434, Российская Федерация, г. Москва, Тимирязевская ул., 49), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1826-3648>, Researcher ID: B-9463-2018, SPIN-код: 8272-6031, [kravchenko-in71@yandex.ru](mailto:kravchenko-in71@yandex.ru)

**Феськов Сергей Александрович**, кандидат технических наук, доцент кафедры технического сервиса Брянского государственного аграрного университета (243365, Российская Федерация, г. Брянск, с. Кокино, ул. Советская, 2а), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5978-6517>, SPIN-код: 7637-8485, [feskovwork@gmail.com](mailto:feskovwork@gmail.com)

**Сенин Петр Васильевич**, доктор технических наук, профессор кафедры технического сервиса машин Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3400-7780>, Researcher ID: H-1219-2016, SPIN-код: 3197-5080, [vice-rector-innov@adm.mrsu.ru](mailto:vice-rector-innov@adm.mrsu.ru)

**Чумаков Павел Васильевич**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технического сервиса машин Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8504-5907>, Researcher ID: G-8320-2018, [pav-chumakov@yandex.ru](mailto:pav-chumakov@yandex.ru)

**Гуцан Александр Александрович**, магистр, ассистент кафедры технического сервиса Брянского государственного аграрного университета (243365, Российская Федерация, г. Брянск, с. Кокино, ул. Советская, 2а), ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1118-7250>, [gagauz0326@gmail.com](mailto:gagauz0326@gmail.com)

*Заявленный вклад авторов:*

И. Н. Кравченко – контроль, лидерство и наставничество в процессе планирования и проведения исследования; проверка воспроизводимости результатов экспериментов и исследования в рамках основных или дополнительных задач работы.

С. А. Феськов – применение статистических, математических, вычислительных и других формальных методов для анализа данных исследования; разработка методологии исследования; создание моделей.

П. В. Сенин – формулирование идеи исследования, целей и задач.

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

А. А. Гуцан – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор данных.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*Поступила в редакцию 25.11.2024; поступила после рецензирования 11.12.2024; принята к публикации 19.12.2024*

*About the authors:*

**Igor N. Kravchenko**, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Technical Service of Machinery and Equipment, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (49 Timiryazevskaya St., Moscow 127434, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1826-3648>, Researcher ID: B-9463-2018, SPIN-code: 8272-6031, [kravchenko-in71@yandex.ru](mailto:kravchenko-in71@yandex.ru)

**Sergey A. Feskov**, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Technical Service, Bryansk State Agrarian University (2a Sovetskaya St., Kokino, Bryansk 243365, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5978-6517>, SPIN-code: 7637-8485, feskovwork@gmail.com

**Petr V. Senin**, Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Department of Technical Service of Machines, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3400-7780>, Researcher ID: H-1219-2016, SPIN-code: 3197-5080, vice-rector-innov@adm.mrsu.ru

**Pavel V. Chumakov**, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technical Service of Machines, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8504-5907>, Researcher ID: G-8320-2018, pav-chumakov@yandex.ru

**Alexander A. Gutsan**, Master's Degree, Assistant of the Department of Technical Service, Bryansk State Agrarian University (2a Sovetskaya St., Kokino, Bryansk 243365, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1118-7250>, gagauz0326@gmail.com

*Contribution of the authors:*

I. N. Kravchenko – control, leadership and mentoring in the process of planning and conducting the study; checking the reproducibility of the results of experiments and study within the framework of the main or additional tasks of the study.

S. A. Feskov – using statistical, mathematical, computational and other formal techniques to analyze the study data; developing the study methodology; creating models.

P. V. Senin – formulating the study idea, goals and objectives.

P. V. Chumakov – conducting the study process including performing the experiments and data collection; preparing a manuscript; visualizing the study results and data obtained.

A. A. Gutsan – conducting the study including performing the experiments and data collection.

*All authors have read and approved the final manuscript.*

*Submitted 25.11.2024; revised 11.12.2024; accepted 19.12.2024*

**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. Levitsev – Deputy Editor-in-Chief. Tel.: +7 (8342) 254101.

Mikhail N. Chatkin – Deputy Editor-in-Chief. Tel.: +7 (8342) 254420.

Ekaterina P. Gordina – Executive Editor. Tel.: +7 (8342) 481424.

## Уважаемые авторы и читатели!

Журнал «Инженерные технологии и системы» размещен на платформе Российского центра научной информации (<https://journals.rcsi.science/2658-4123>).



Российский  
центр научной  
информации

ИНЖЕНЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

ГЛАВНАЯ О ЖУРНАЛЕ ВЫПУСКИ КОНТАКТЫ АРХИВ ДО 2025 Г. ВСЕ ЖУРНАЛЫ

Главная > **Инженерные технологии и системы**



### Инженерные технологии и системы

Ревстровая запись: [ПИ № ФС77-74640 от 24.12.2018](#)

#### Учредитель

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва»

#### Главный редактор

Сенин Петр Васильевич, доктор технических наук, профессор

#### Периодичность / доступ

4 выпуска в год / открытый

#### Входит в

[Белый список \(4 уровень\)](#), перечень ВАК, [РИНЦ](#), [RSCI](#), [Web of Science \(ESCI\)](#)

#### Официальный сайт журнала:

<https://vestnik.mrsu.ru>

**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 и 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 является участником ассоциации [OASPA](#), партнерства [CrossRef](#), Комитета по публикационной этике [COPE](#), профессионального сообщества "[Ассоциация научных редакторов и издателей \(АНРИ\)](#)".



Редакторы – *М. А. Сульдина, С. Х. Зинина*  
Перевод *Н. Н. Плеханковой*  
Компьютерная верстка *Е. А. Климкиной*  
Информационная поддержка *Р. В. Карасева*

Территория распространения – Российская Федерация, зарубежные страны.

Подписано в печать 14.03.2025 г. Дата выхода в свет 31.03.2025 г.

Формат  $70 \times 100 \frac{1}{16}$ . Усл. печ. л. 14,3.

Тираж 1 000 экз. 1 завод – 100 экз. Заказ № 121. Свободная цена.

Адрес типографии: 430005, Российская Федерация, Республика Мордовия, г. Саранск, ул. Советская, д. 24  
(Издательство федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования  
«Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева»)



Editors *M. A. Suldina, S. H. Zinina*  
Translation *N. N. Plekhankova*  
Desktop publishing *E. A. Klimkina*  
Informational support *R. V. Karasev*

Distributed in Russian Federation and foreign countries.  
Signed to print 14.03.2025. Date of publishing 31.03.2025.  
Sheet size  $70 \times 100 \frac{1}{16}$ . Conventional printed sheets 14.3.  
Number of copies 1 000. 1<sup>st</sup> edition – 100 copies. Order no. 121. Free price.

Address of Printing House: 24 Sovetskaya St., Saransk 430005, Republic of Mordovia, Russian Federation  
(Publishing House of National Reserch Mordovia State University)