

ISSN 2658-4123
eISSN 2658-6525

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

2026 Том Vol. **36** № No. **2**

DOI: [10.15507/2658-4123](https://doi.org/10.15507/2658-4123)

<https://doi.org/10.15507/2658-4123.26362>

ISSN 2658-4123
eISSN 2658-6525

Том 36, № 2. 2026

Vol. 36, no. 2. 2026

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

Founded in January 1990
Periodicity:
Quarterly

16+



ИНЖЕНЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ ENGINEERING TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

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

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

SCIENTIFIC JOURNAL

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

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

Главный редактор П. В. Сенин

Editor-in-Chef P. V. Senin

Предыдущее название (до 2019 года):
Вестник Мордовского университета

The previous name until beginning of 2019:
Mordovia University Bulletin

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

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

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

Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ) и CrossRef

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

Подписной индекс – **70539**

Адрес учредителя, издателя и редакции:

430005, Российская Федерация,
Республика Мордовия,
г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68/1
Тел./факс: +7 (8342) 48-14-24

Founder, Publisher and Editorial Office address:

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

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

Инженерные технологии и системы

рецензируемый научный журнал открытого доступа

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

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

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

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

Распространение – Российская Федерация, зарубежные страны.

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

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

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

Журнал индексируется и архивируется в базах данных:

Web of Science Core Collection (ESCI)

Russian Science Citation Index (RSCI)

Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)

Журнал является членом Open Access Scholarly Publishers Association (OASPA),

Directory of Open Access Journals (DOAJ),

Committee on Publication Ethics (COPE),

Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ),

CrossRef

Engineering Technologies and Systems

A peer-reviewed open access academic journal

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

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

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

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

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

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

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

Instruments and Methods of Experimental Physics

Optics

Electrophysics, Electrophysical Installations

Friction and Wear in Machines

Gardening, Olericulture, Viticulture and Medicinal Plants

Technologies, Machinery and Equipment for Agroindustrial Complex

Electrotechnologies, Electrical Equipment and Power Supply of Agroindustrial Complex

The journal is indexed and archived by databases:

Web of Science Core Collection (ESCI)

Russian Science Citation Index (RSCI)

Russian Index of Science Citation

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

Directory of Open Access Journals (DOAJ),

Committee on Publication Ethics (COPE),

Association of Scientific Editors and Publishers (ASEP),

CrossRef

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Несмьян 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)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Кравченко В. А., Кравченко Л. В., Сергеев Н. В., Журба В. В. Методика определения характеристик тракторного движения пропашного машинно-тракторного агрегата	238
Чаплыгин М. Е. Структура факторного пространства как научно-методическая основа обоснования системы дифференцирования машин	262
Вольвак С. Ф., Пастухов А. Г., Бахарев Д. Н., Тимашов Е. П., Коцаев И. А. Определение рациональных параметров барабанного дозатора малогабаритного комбикормового агрегата по результатам экспериментальных исследований	277
Коновалов В. В., Моисеев А. В., Зайцев В. Ю., Донцова М. В. Алгоритмизация методики интерполяционных моделей при обработке экспериментальных результатов	300
Димитров В. П., Нуруддинова И. Н., Борисова Л. В., Черняев А. Т. Структура информационной системы для решения задачи настройки комбайнов	327

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

Никитенко Г. В., Антонов С. Н., Гаркавенко Н. С. Оценка влияния количества немагнитных вставок статора на величину силы тяги якоря линейного электродвигателя секатора	344
Багаев А. А., Бобровский С. О. Научно-методические основы расчета параметров электродного термосифонного нагревателя молока при пастеризации	367

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Лиханов В. А., Лопатин О. П. Снижение дымности и сажеобразования в дизельном двигателе при полном замещении нефтяного топлива метанолом и метиловым эфиром рапсового масла	392
Фадеев И. В., Успенский И. А., Чаткин М. Н., Юхин И. А., Петров С. Р., Казарин А. С. Тетраборфосфатные ингибиторы для защиты рабочих органов сельскохозяйственных машин от коррозии в процессе межсезонного хранения	416
Плотников С. А., Клуонис А. С. Трибологические свойства фрез, работающих в условиях сплошного резания	433
<i>Информация для авторов и читателей</i>	448

CONTENTS

TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT

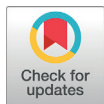
Kravchenko V. A., Kravchenko L. V., Sergeev N. V., Zhurba V. V. The Methods for Determining the Characteristics of the Trajectory Movement of a Row Machine-Tractor Unit	238
Chaplygin M. E. The Factor Space Structure as a Scientific and Methodological Basis for Substantiating the System of Differentiation of Machines	262
Volvak S. F., Pastukhov A. G., Bakharev D. N., Timashov E. P., Koshchaev I. A. Determination of the Rational Parameters of a Drum Dispenser for a Small-Sized Compound Feed Unit by the Results of Experimental Studies	277
Konovalov V. V., Moiseev A. V., Zaitsev V. Yu., Dontsova M. V. Algorithmization of Interpolation Model Methods in Processing Experimental Results	300
Dimitrov V. P., Nurutdinova I. N., Borisova L. V., Chernyaev A. T. Structure of the Information System for Solving the Problem of Adjusting Harvesters	327

ELECTRICAL TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT

Nikitenko G. V., Antonov S. N., Garkavenko N. S. Assessing the Effect of the Number of Stator Non-Magnetic Spacers on Armature Pulling Force of Pruner Linear Motor	344
Bagaev A. A., Bobrovskiy S. O. Scientific and Methodological Bases for Calculating the Parameters of Electrode Thermosiphon Milk Heaters in Pasteurizing	367

MECHANICAL ENGINEERING

Likhanov V. A., Lopatin O. P. Reduction of Smoke and Soot Formation in a Diesel Engine by Replacing Completely Petroleum Fuel with Methanol and Methyl Ester of Rapeseed Oil	392
Fadeev I. V., Uspensky I. A., Chatkin M. N., Yukhin I. A., Petrov S. R., Kazarin A. S. Tetraborophosphate Inhibitors for Protecting Agricultural Machinery Components Against Corrosion during Off-Season Storage	416
Plotnikov S. A., Kluonis A. S. Tribological Properties of End Milling Cutters Operating under Continuous Cutting Conditions	433
<i>Information for Authors and Readers of the Journal</i>	448

**ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ /
TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT**<https://doi.org/10.15507/2658-4123.26362.238-261>EDN: <https://elibrary.ru/irzvuv>

УДК / UDK 631.316.4

*Оригинальная статья / Original article***Методика определения характеристик траекторного движения пропашного машинно-тракторного агрегата****В. А. Кравченко¹, Л. В. Кравченко¹✉,
Н. В. Сергеев², В. В. Журба¹**¹ *Донской государственный технический университет,
г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация,
<https://ror.org/00x5je630>*² *Донской государственный аграрный университет,
г. Зерноград, Российская Федерация, <https://ror.org/02ephqy68>*✉ lyudmila.vl.kravchenko@yandex.ru*Аннотация*

Введение. Успешное выполнение задач по обеспечению продовольственной безопасности страны, стоящих перед работниками агропромышленного комплекса Российской Федерации, и интегрирование сельскохозяйственной продукции в мировой рынок неразрывно связано с проблемой повышения эффективности функционирования сельскохозяйственных агрегатов на базе колесных пропашных тракторов. При выполнении технологических операций пропашной агрегат перемещается с боковым уводом колес трактора, что отрицательно сказывается на его тягово-энергетических показателях и качестве выполнения работ за счет недопустимого по агротехническим требованиям отклонения в боковом направлении рабочих органов. Повышение функциональных показателей агрегата при культивации междурядий пропашных культур можно обеспечить установкой на колеса трактора шин, обладающих рациональной величиной коэффициентов сопротивления боковому уводу.

Цель исследования. Снижение эксплуатационных и энергетических затрат, а также повышение качества технологической операции при траекторном движении сельскохозяйственных пропашных агрегатов путем комплектования колес ходовых систем универсально-пропашных тракторов шинами с рациональной боковой жесткостью.

Материалы и методы. Объектами испытаний в полевых условиях являлись серийные шины 9.00R-20 и 15,5R-38, пропашной агрегат, состоящий из трактора Беларус 80.1 и навесного культиватора КРН-5,6. Исследования проводились на базе теоретико-экспериментального метода, основанного на одновременном проведении аналитических расчетов и экспериментальных работ.

Результаты исследования. Определены рациональные величины коэффициентов сопротивления уводу шин трактора Беларус 80.1.

© Кравченко В. А., Кравченко Л. В., Сергеев Н. В., Журба В. В., 2026

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. При развиваемом трактором Беларус 80.1 крюковым усилием около 9 кН и его буксовании 12–15 % необходимо комплектовать его управляемые колеса шинами с боковой жесткостью более 18 кН/рад, а ведущие колеса – шинами с боковой жесткостью не менее 50 кН/рад. Предлагаемую методику можно использовать при комплектовании шинами ходовых систем любых пропашных сельскохозяйственных агрегатов.

Ключевые слова: пропашной агрегат, тракторное движение, пневматическое колесо, шина пневматического колеса, увод шины, коэффициент сопротивления боковому уводу

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Кравченко В.А., Кравченко Л.В., Сергеев Н.В., Журба В.В. Методика определения характеристик тракторного движения пропашного машинно-тракторного агрегата. *Инженерные технологии и системы*. 2026;36(2):238–261. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.26362.238-261>

The Methods for Determining the Characteristics of the Trajectory Movement of a Row Machine-Tractor Unit

V. A. Kravchenko^a, L. V. Kravchenko^a ✉,

N. V. Sergeev^b, V. V. Zhurba^a

^a Don State Technical University,

Rostov-on-Don, Russian Federation, <https://ror.org/00x5je630>

^b Don State Agrarian University,

Zernograd, Russian Federation, <https://ror.org/02ephqy68>

✉ lyudmila.vl.kravchenko@yandex.ru

Abstract

Introduction. At present, the workers of the agro-industrial complexes in the Russian Federation are faced with the task of ensuring the country food security and integrating into the global market of agricultural products. The successful implementation of these tasks depends on the solution of increasing the efficiency of agricultural units based on wheeled row tractors. When performing technological operations, the row unit moves with lateral wheel slip that negatively affects its traction and energy indicators and the quality of operating, because of the deviation in the lateral direction of the working bodies of agricultural machines unacceptable according to agrotechnical requirements. Improving the unit functional indicators during the cultivation of row-spacing of row crops can be ensured by installing tires having a rational value of lateral recovery resistance coefficients on the tractor wheels.

Aim of the Study. The study is aimed at reducing operating and energy costs and improving the quality of technological operation during the trajectory movement of agricultural row units through completing the wheels of running systems of universal row tractors with tires of rational lateral stiffness.

Materials and Methods. The objects of field testing were standard tires 9.00R-20 and 15,5R-38, a row unit consisting of a tractor Belarus 80.1 and an attached cultivator KRN-5,6. The studies were conducted using a theoretical and experimental method based on simultaneous carrying out of analytical calculations and experimental works.

Results. There have been determined rational values of the coefficients of resistance to the tire drift of the tractor Belarus 80.1.

Discussion and Conclusion. When the tractor Belarus 80.1 generates a drawbar pull of about 9 kN and its slipping is 12–15%, it is necessary to equip its dirigible wheels with tires having a lateral rigidity of more than 18 kN/rad, and driving wheels with tires having a lateral rigidity of at least 50 kN/rad. The proposed technique can be used when equipping tires of running systems of any row agricultural units.

Keywords: row unit, trajectory motion, pneumatic wheel, pneumatic wheel tire, tire slip, tire slip resistance coefficient

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

For citation: Kravchenko V.A., Kravchenko L.V., Sergeev N.V., Zhurba V.V. The Methods for Determining the Characteristics of the Trajectory Movement of a Row Machine Tractor Unit. *Engineering Technologies and Systems*. 2026;36(2):238–261. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.26362.238-261>

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшей задачей работников сельского хозяйства Российской Федерации является обеспечение продовольственной безопасности страны на основе эффективного конкурентоспособного агропромышленного производства, а также успешное интегрирование в мировой рынок сельскохозяйственной продукции. Для решения данной проблемы необходимо существенно снизить себестоимость растениеводческой продукции, применяя в агропромышленном комплексе новые технологии и совершенствуя мобильные энергетические средства (МЭС). Этого можно достичь путем повышения качества выполнения технологических операций и уменьшения трудовых и эксплуатационных затрат за счет значительного прироста производительности машинно-тракторных агрегатов (МТА) и сокращения удельного расхода топлива. Данный подход неразрывно связан с решением научной проблемы по разработке методов и технических средств снижения динамичности и энергоемкости сельскохозяйственных МТА.

В мире и России применение в сельском хозяйстве МЭС с колесными ходовыми системами превышает 85 % [1–3]. Современные исследователи предлагают применять различные технические решения, снижая динамичность нагрузки на звенья МТА для повышения его тягово-энергетических и эксплуатационных показателей [4–6]. Например, оснащать силовую передачу пневмогидравлической муфтой сцепления [5; 7; 8], вводить в трансмиссию МЭС дополнительные автоматически подключаемые и отключаемые инерционные массы [9], гидростатические передачи и упругодемпфирующие механизмы [10–12], устанавливая различного рода упругие элементы в привод ведущих осей [13–15], в их сцепные элементы и навесные устройства [16–18]. При этом исследования ограничиваются рассмотрением только прямолинейного движения МТА во время выполнения технологической операции [19–21].

При выполнении различных полевых работ МТА перемещается по обрабатываемому полю в основном криволинейно [19–21] в связи с наличием действующих на пропашной агрегат внешних управляющих и возмущающих факторов [19; 21; 22], обуславливающих перемещение колесного трактора с боковым уводом колес.

К управляющим факторам относится угол поворота управляющих, обычно передних, колес θ универсально-пропашного трактора. Возмущающим фактором в первую очередь является отклоняющий момент M , создаваемый сельскохозяйственной машиной-орудием [21–23].

Проведенные исследования показали, что боковой увод шин ведущих колес трактора отрицательно влияет на его тяговые качества: коэффициенты сопротивления качению и буксованию колес возрастают, а тяговый КПД снижается [19; 24; 25]. В то же время при движении МЭС с боковым уводом у сельскохозяйственных машин в составе агрегата могут возникать отклонения рабочих органов в боковом направлении, недопустимые по агротехническим требованиям при выполнении технологической операции. Особенно важно это учитывать во время обработки междурядий пропашных культур. В процессе ее реализации предусматривается защитная зона, величина которой зависит от точности траекторного движения агрегата. Для достижения удовлетворительного траекторного движения пропашного агрегата требуется увеличение управляющего воздействия оператора, что не всегда положительно влияет на критерий качества выполнения операции по культивации междурядий [21; 26; 27]. Так, возрастают психомоторные затраты тракториста, снижаются эксплуатационные показатели работы пропашного агрегата и качество выполнения технологической операции. Появляется вероятность частичного или полного повреждения выращиваемых пропашных культур, что негативно отражается на их урожайности [26; 28; 29].

Поэтому научные исследования, направленные на увеличение точности движения колесных тракторов в составе МТА по заданной траектории, что способствует увеличению урожая выращиваемых пропашных культур, являются актуальными.

Целью исследования является повышение функциональных показателей универсально-пропашных тракторов в составе сельскохозяйственных агрегатов при траекторном движении путем установки на колеса ходовых систем шин, обладающих рациональной боковой жесткостью.

Увеличение эффективности функционирования сельскохозяйственных пропашных агрегатов может быть обеспечено за счет комплектования их энергетических средств шинами, обладающими рациональной величиной коэффициентов сопротивления боковому уводу. В связи с этим необходимо определить рациональные значения коэффициентов сопротивления боковому уводу управляемых и ведущих пневматических колес универсально-пропашного МЭС для сохранения его тягово-сцепных свойств и обеспечения минимально допустимой величины защитной зоны, определяемой агротехническими требованиями для конкретной пропашной культуры. Основу решения поставленной задачи составляют аналитические расчеты на базе уравнений траекторного движения пропашного агрегата.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

На решение проблемы улучшения показателей траекторного движения машинно-тракторных сельскохозяйственных агрегатов были направлены многие научно-исследовательские работы.

Первые исследования криволинейного движения транспортно-технологических машин возникли с появлением «самобеглой коляски» (автомобиля). Российский ученый, профессор Н. Е. Жуковский¹, впервые заложил основы в развитие теории криволинейного движения двухосной машины с задним ведущим мостом, имеющим колеса с абсолютной боковой жесткостью.

Большой вклад в дальнейшее развитие положений теории траекторного движения автомобиля сделали отечественные и зарубежные ученые: Е. А. Чудаков², Г. В. Зимелев³, А. С. Литвинов⁴, G. Becker⁵, Н. Fromm⁶ и др. Однако установить с определенной точностью силовые зависимости взаимодействия пневматического колеса с деформируемой опорной поверхностью, что имеет большое значение для ходовых систем сельскохозяйственных МТА, на основании их исследований не представляется возможным. Для упрощения математических моделей рассматривался процесс движения автомобиля по жесткой опорной поверхности при постоянных силовых воздействиях без крюковой нагрузки на относительно высоких скоростях.

Были установлены основные закономерности криволинейного движения по заданной траектории транспортно-технологических средств [21; 28; 30]. Исследования осуществлялись на отдельно взятом тракторе при перемещении его по кругу с малыми скоростями [21; 30; 31] или на транспортных агрегатах по твердому основанию [32], не учитывалось влияние бокового увода шин колес ходовой части трактора на точность траекторного движения при воздействии на агрегат внешних воздействий.

Анализ работ, связанных с исследованиями криволинейного движения сельскохозяйственных агрегатов, показывает, что на его параметры оказывает влияние множество факторов, в том числе деформационные характеристики шин, сопротивление качению и буксование ведущих колес МЭС.

При криволинейном перемещении агрегата МЭС неизбежно воспринимает боковые силы, связанные с центробежным ускорением и моментом от неравномерного сопротивления движению рабочих органов по ширине сельскохозяйственной машины [21; 27; 30]. В результате этого наблюдается возникновение бокового увода шин передних и задних колес трактора, от соотношения которых главным образом зависят характеристики траекторного движения агрегата.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования

В качестве объектов исследования были взяты серийные шины 9.00R-20 и 15.5R-38, пропашной агрегат, состоящий из трактора Беларус 80.1 и культиватора КРН-5,6, со заблокированной в боковом направлении навеской.

¹ Жуковский Н.Е. К динамике автомобиля. М., Л.: Гостехиздат; 1950. 608 с.

² Чудаков Е.А. Теория автомобиля. М.: Машгиз; 1950. 344 с.

³ Зимелев Г.В. Теория автомобиля. М.: Машгиз; 1959. 312 с.

⁴ Литвинов А.С. Управляемость и устойчивость автомобиля. М.: Машиностроение; 1971. 416 с.

⁵ Becker G., Fromm H., Maruhn H. Schwingungen in Automobillenkugeln («Shimmy»). Berlin; 1931. 150 p.

⁶ Fromm H. Brief Report on the History of the Theory of Shimmi. In: NACA. NACA TM 1365; 1954. pp. 181–189.

Материалы и процедура исследования

Определение деформационных характеристик пневматических шин колес трактора Беларус 80.1 осуществлялось с помощью измерительного комплекса «шинный тестер» [33; 34].

Полевые исследования тракторного движения пропашного агрегата проводились по ГОСТ 7057-2001⁷ и ГОСТ 20915-2011⁸ с целью установления характеристик тракторного движения на поле, предназначенного для посева (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

T a b l e 1

Показатели почвы на поле, предназначенного для посева
Indicators of the soil in the field for sowing

Показатели / Indicators		Значения показателей / Values of indicators
Неплоскость поверхности участка, мм / Nonflatness of the site surface of the, mm		18
Уклон участка в габаритных размерах «шинного тестера» и пропашного агрегата, % / The site slope in the outline dimensions of the "tire tester" and the raw unit, %	вдоль поля / along the field	< 3
	поперек поля / across the field	< 4
Тип почвы / Soil type		Предкавказский карбонатный чернозем / Pre-Caucasian carbonate chernozem
Влажность почвы в слоях, % / Soil moisture in layers, %	0–5 см / 0–5 cm	9,85
	5–10 см / 5–10 cm	19,76
	10–15 см / 10–15 cm	22,68
Твердость в слоях почвы, МПа / Hardness in soil layers, MPa	0–5 см / 0–5 cm	0,18
	5–10 см / 5–10 cm	1,19
	10–15 см / 10–15 cm	1,38

Для получения необходимой достоверности зачетный участок выбирался длиной от 400 до 500 м, что способствовало получению значений измеряемых величин с 50–60-ти кратной повторностью.

Для выполнения задачи исследования был принят теоретико-экспериментальный метод, согласно которому предусматривалось совместное проведение аналитических расчетов и экспериментальных работ, опирающихся на математическое моделирование процессов при тракторном движении агрегата и последующие натурные испытания.

Методикой испытаний пропашного агрегата была предусмотрена имитация его движения в междурядьях пропашных культур. При культивации поля, подготовленного под посев, заранее подготовленные междурядья обозначались вешками. Траектория движения, оцениваемая линейными отклонениями в боковом направлении рабочих органов культиватора, переднего и заднего мостов

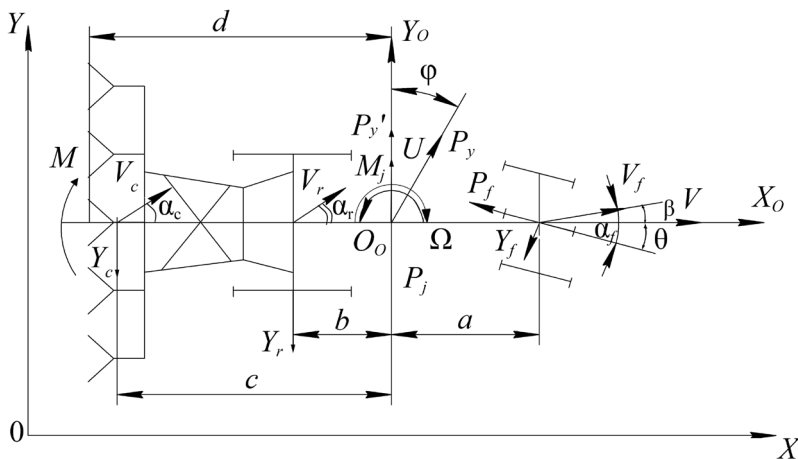
⁷ ГОСТ 7057-2001. Тракторы сельскохозяйственные. Методы испытаний. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200030186> (дата обращения: 03.07.2025).

⁸ ГОСТ 20915-2011. Испытания сельскохозяйственной техники. Методы определения условий испытаний. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200094197> (дата обращения: 03.07.2025).

трактора и угловыми отклонениями его остова, определялась по меткам на поле от синхронного впрыска дизтоплива тремя бесштифтовыми форсунками. Углы поворота управляемых колес θ и бокового увода задней оси трактора регистрировались потенциометрическими датчиками, а сила тяги на крюке и отклоняющий момент – тензометрическими датчиками в специальной автосцепке.

При криволинейном перемещении МТА на колеса МЭС действуют боковые силы [19; 20; 23], поэтому они двигаются с уводом, что негативно влияет на тягово-сцепные качества движителей базового трактора [19], а также на точность тракторного движения пропашного агрегата, от которой зависит величина необходимой защитной зоны для выращиваемой культуры. Оценкой конструктивного совершенства шины в таком случае могут быть показатели, согласованные со значениями параметров агрегата и характеризующие ее способность противостоять уводу [24; 35]. Этими показателями являются коэффициенты сопротивления боковому уводу шин ведущих и управляемых колес трактора. Их величину необходимо установить исходя из заданного уровня тяговых качеств пропашного трактора и требуемой точности его тракторного движения.

Движение агрегата рассмотрели в малых отклонениях относительно междурядья курса. На рисунке 1 представлена принципиальная схема перемещения пропашного агрегата при плоскопараллельном движении в горизонтальной системе координат XOY .



Р и с. 1. Расчетная схема перемещения пропашного агрегата

F i g. 1. Calculation scheme of the row unit movement

Источник: рисунки 1–3 составлены авторами статьи.

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

Здесь и в последующих математических выражениях введены следующие обозначения: X_o , Y_o – абсцисса и координата горизонтальной системы координат плоскопараллельного движения агрегата соответственно; O_o – центр инерции агрегата; U , Ω – боковая и угловая скорости центра инерции агрегата соответственно, c^{-1} ;

V, V_f, V_r, V_c – скорости перемещения агрегата по продольной оси, центра масс переднего управляемого моста, центра масс заднего ведущего моста, центра масс культиватора соответственно, м/с; a, b, c – координаты центра инерции O_o относительно центров масс соответственно переднего и заднего мостов МЭС и культиватора, м; d – координата центра инерции O_o относительно крайней задней точки агрегата, м; M, M_j – отклоняющий момент из-за неравномерного сопротивления рабочих органов культиватора и инерциальный момент агрегата относительно его центра инерции O_o соответственно, Н·м; P_j, P_f, P_y, P'_y – сила боковой инерции центра O_o , сопротивления качению, центробежная сила инерции агрегата и боковая составляющая по оси Y_o O_o центробежной силы инерции агрегата соответственно, Н; Y_f, Y_r, Y_c – боковые реакции почвы на передние и задние колеса МЭС, на рабочие органы культиватора соответственно, Н; θ – угол поворота от нейтрального положения управляемых колес, рад (град.); φ, β – углы отклонения вектора центробежной силы инерции агрегата от ординаты и скорости перемещения переднего управляемого моста соответственно, °; $\alpha_f, \alpha_r, \alpha_c$ – углы увода соответственно передних и задних колес МЭС, рабочих органов культиватора, °.

Скорость перемещения агрегата по оси X приняли постоянной.

Условия равновесия сил и моментов представили в виде системы уравнений:

$$\begin{cases} P_j + Y_f \cos \theta + Y_r - P_y \cos \varphi - P_f \sin \theta = 0 \\ M_j + bY_r + cY_c - aY_f \cos \theta + P_j a \sin \theta - M = 0 \end{cases} \quad (1)$$

Если принять процесс бокового увода как безынерционную модель [19; 24; 25], можно записать:

$$Y_f = K_f \alpha_f; \quad Y_r = K_r \alpha_r; \quad Y_c = K_c \alpha_c, \quad (2)$$

где K_f, K_r, K_c – коэффициенты сопротивления боковому уводу соответственно передних, задних колес трактора и рабочих органов культиватора.

Так как углы поворота и бокового увода управляемых колес при перемещении пропашного агрегата по заданной траектории незначительны, то из рисунка 1 получили:

$$\alpha_f = \theta + \frac{U - a\Omega}{V}; \quad a_r \approx \operatorname{tg} a_r = \frac{U + b\Omega}{V}, \quad a_c \approx \operatorname{tg} a_c = \frac{U + c\Omega}{V}. \quad (3)$$

Внешние силы P_j и P_y , а также момент M_j , действующие на пропашной агрегат, установили по уравнениям

$$P_j = m\dot{U}, \quad (4)$$

$$P_y = m \Omega^2 R_t = \frac{m \Omega V}{\cos \varphi}, \quad (5)$$

$$M_j = I \dot{\Omega}, \quad (6)$$

где m – масса агрегата, кг; R_t – радиус поворота агрегата, м; I – момент инерции агрегата, кг·м².

После преобразований системы уравнений (1) и подстановки в нее зависимостей (2)–(6) система приняла вид:

$$\begin{cases} \dot{U} + \frac{K_f + K_r + K_c}{mV} U + \left(\frac{bK_r + cK_c - aK_f}{mV} - V \right) \Omega = \frac{P_f \sin \theta - \theta K_f}{m} \\ \dot{\Omega} + \frac{b^2 K_r + c^2 K_c + a^2 K_f}{IV} \Omega + \frac{bK_r + cK_c + aK_f}{IV} U = \frac{a(K_f \theta - P_f \sin \theta)}{I} + \frac{1}{I} M \end{cases}$$

Ввели обозначения:

$$A = \frac{K_f + K_r + K_c}{mV}, \quad B = \frac{bK_r + cK_c - aK_f}{mV} - V, \quad C = \frac{b^2 K_r + c^2 K_c - a^2 K_f}{IV},$$

$$D = \frac{bK_r + cK_c + aK_f}{IV}, \quad e_1 = \frac{P_f \sin \theta - K_f}{m}, \quad e_2 = \frac{a \left(K_f - \frac{P_f \sin \theta}{\theta} \right)}{I}, \quad e_3 = \frac{1}{I}.$$

Тогда

$$\begin{cases} \dot{U} + AU + B\Omega = e_1 \theta \\ \dot{\Omega} + C\Omega + DU = e_2 \theta + e_3 M \end{cases} \quad (7)$$

Дополнительно представили уравнения угловых и линейных отклонений остова трактора и рабочих органов культиватора.

Угловое отклонение равно:

$$\dot{\phi} = \Omega.$$

Линейное отклонение рабочих органов культиватора в боковом направлении у согласно схеме рисунка 1 составило:

$$\dot{y} = U + \Omega d - V \varphi. \quad (8)$$

Для установления рациональной величины коэффициента сопротивления боковому уводу задних ведущих колес МЭС в уравнениях (7) и (8) заменили U , исходя из уравнения (3), на $\alpha = \alpha_3$:

$$U = V\alpha - b\Omega.$$

Тогда система уравнений, описывающих тракторное движение пропашного агрегата, приняла вид:

$$\begin{cases} V\dot{\alpha} + VA\alpha - b\dot{\Omega} + (B - Ab)\Omega = e_1 \theta \\ VD\alpha + \dot{\Omega} + (c - bD)\Omega = e_2 \theta + e_3 M \\ \dot{y} + V\varphi - (b - d)\Omega = 0 \\ \dot{\phi} = \Omega \end{cases} \quad (9)$$

В системе уравнений (12) выходные показатели – α , Ω , φ и боковое отклонение рабочих органов культиватора y , а входные – угол поворота передних управляемых колес трактора θ и момент M .

Управляющее воздействие θ , как известно, задается трактористом. Передаточную функцию тракториста $W_M^y(p)$, исходя из исследований, проведенных Ю. А. Ганькиным⁹, представили в виде:

$$W_M^y(p) = \frac{l_y e^{-\tau p}}{Tp + 1},$$

где p – оператор дифференцирования, $p = \frac{d}{dt}$; l_y – показатель реакции тракториста на боковое перемещение рабочих органов культиватора, $l_y = 1$; τ – время реакции тракториста ($\tau = 0,2 - 0,3$ с); T – постоянная времени нервно-мышечной инерционности тракториста ($T = 0,1 - 0,3$ с).

Тогда систему уравнений, описывающую управляемое тракторное движение пропашного МТА, записали

$$\begin{cases} V(P + A)\alpha + [-bp + (B - bA)]\Omega - \frac{l_1 l_y}{e^{\tau p}(TP + 1)} y = 0 \\ VD\alpha + [P + (c - bD)]\Omega - \frac{l_2 l_y}{e^{\tau p}(TP + 1)} y = l_3 M \\ P\varphi - \Omega = 0 \\ PY + V\varphi - V\alpha + (b - d)\Omega = 0 \end{cases}.$$

В управляемом тракторном движении агрегата входное воздействие – отклоняющий момент M от разного сопротивления почвы на рабочие органы культиватора его левых и правых секций.

В результате анализа полевых испытаний пропашного агрегата на базе трактора тягового класса 1,4 было установлено, что воздействующие на агрегат факторы и выходные показатели его тракторного движения являются случайными величинами. Они характеризуются математическим ожиданием, среднеквадратическим отклонением, дисперсией, корреляционной функцией и спектральной плотностью. Математические ожидания показателей тракторного движения пропашных агрегатов равны нулю. Дисперсии постоянны.

Такие случайные процессы называются стационарными и центрированными. Значения среднеквадратичных отклонений показателей тракторного движения пропашных агрегатов представлены в таблице 2.

Линейное отклонение центра инерции примерно одинаковое (6–7 см) и практически не меняется при колебании параметров агрегата, так как фактически оно зависит только от действий тракториста. Угловое отклонение центра инерции зависит и от квалификации тракториста, и от чувствительности агрегата к внешним воздействиям. Значительное влияние на угловое отклонение центра инерции агрегата оказывают коэффициенты сопротивления уводу колес трактора.

⁹ Ганькин Ю.А. Динамика управляемого движения мобильных машин. Самара: Самарский Дом печати; 1997. 184 с.

Среднеквадратичные отклонения показателей траекторного движения пропашного агрегата
Standard deviations of indicators of the row unit trajectory movement

Вид среднеквадратичного отклонения / Type of standard deviation	Среднеквадратичные отклонения σ показателей траекторного движения пропашного агрегата в зависимости от скорости / Standard deviations σ of the indicators of the row unit trajectory movement depending on the speed			
	$R_{cr} = 6,22 \text{ кН} / R_{cr} = 6.22 \text{ kN}$			$R_{cr} = 9,14 \text{ кН} / R_{cr} = 9.14 \text{ kN}$
	1,82 м/с / 1.82 m/s	2,45 м/с / 2.45 m/s	3,58 м/с / 3.58 m/s	2,12 м/с / 2.12 m/s
$\sigma_y, \text{ см} / \sigma_y, \text{ cm}$	6,40	5,90	6,10	6,30
$\sigma_\varphi, ^\circ$	0,65	0,62	0,78	1,03
$\sigma_\theta, ^\circ$	1,21	1,15	1,48	2,13
$\sigma_M, \text{ кН} / \sigma_M, \text{ kN}$	0,94	1,18	1,23	1,17

Так, при возрастании тягового усилия P_{cr} величина углового отклонения увеличивается в 1,4–1,7 раза, что объясняется снижением коэффициентов сопротивления уводу передних управляемых колес трактора вследствие уменьшения их весовой нагрузки и уводу задних (ведущих) из-за повышения величины буксования. В результате этого тягово-сцепные свойства МЭС и эксплуатационные показатели пропашного агрегата снижаются. В то же время анализ результатов полевых испытаний пропашного агрегата показывает слабо выраженную корреляционную связь (коэффициент корреляции менее 0,2) между управляющими и возмущающими факторами.

Аналитические расчеты характеристик траекторного движения агрегата выполнили на основе методов статистической динамики, разработанных А. Б. Лурье¹⁰.

Задача заключалась в определении среднеквадратических отклонений случайных величин α и u , предельные значения которых не должны превышать допустимых. При расчетах приняли следующие параметры агрегата: $d = 2,52 \text{ м}$; $V = 2,45 \text{ м/с}$; $m = 3\,990 \text{ кг}$; $K_c = 24\,000 \text{ кН/рад}$; $P_f = 1\,900 \text{ Н}$; $I = 8\,751 \text{ кг/м}^2$; $a = 1,6$; $b = 0,85 \text{ м}$; $c = 2,28 \text{ м}$.

Согласно указанному методу

$$\sigma^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) d\omega, \quad (10)$$

где $S(\omega)$, ω , σ – спектральная плотность, круговая частота и среднеквадратическое отклонение случайного процесса соответственно.

Спектральную плотность линейного бокового отклонения культиватора от задаваемой агротехническими требованиями траектории движения пропашного агрегата определяли зависимостью:

¹⁰ Лурье А.Б. Динамика регулирования навесных сельскохозяйственных агрегатов. Ленинград: Машиностроение; 1969. 287 с.

$$S(\omega) = |W(j\omega)|^2 S_{bx}(\omega), \quad (11)$$

где $|W(j\omega)|$ – модуль частотной передаточной функции; $S_{bx}(\omega)$ – спектральная плотность входного сигнала, т. е. внешнего фактора.

Используя научное наследие А. Б. Лурье и результаты проведенных полевых испытаний пропашного агрегата на базе трактора тягового класса 1,4, спектральные плотности внешнего воздействия, а именно отклоняющего момента M , записали

$$S_M(\omega) = \frac{2D_M \alpha C_M}{\pi} \cdot \frac{\omega^2 + \alpha^2 + \beta^2}{(\alpha^2 + \beta^2 - \omega^2)^2 + 4\alpha^2 \omega^2}, \quad (12)$$

где D_M – дисперсия момента M ($D_M = 1\,368\,900 \text{ Н}^2 \cdot \text{м}^2$); C_c , α , β , – коэффициенты регрессии ($C_c = 3,9$; $\alpha = 0,75$; $\beta = 1,68$).

Для обеспечения дальнейших аналитических расчетов разложили в ряд функцию $e^{\tau p}$ и, ограничиваясь двумя первыми членами разложения, представили ее в следующем виде

$$e^{\tau p} \approx 1 + \tau p.$$

Тогда передаточные функции стали выглядеть так:

$$W_M^a(p) = \frac{b(p)}{a(p)}, \quad W_M^y(p) = \frac{c(p)}{a(p)}, \quad (13)$$

где $a(p)$, $b(p)$, $c(p)$, – определители передаточных функций, вычисляемые по схеме вычисления определителей передаточной функции:

$$a(p) = \begin{vmatrix} V(p+a)(\tau p+1)(Tp+1) & [-bp+(B-bA)](\tau p+1)(Tp+1) & 0 & -l_1 l_y \\ VD(\tau p+1)(Tp+1) & [p+(c-bD)](\tau p+1)(Tp+1) & 0 & -l_1 l_y \\ 0 & -1 & p & 0 \\ -V & (b-d) & V & p \end{vmatrix},$$

$$b(p) = \begin{vmatrix} 0 & [-bp+(B-bA)](\tau p+1)(Tp+1) & 0 & -l_1 l_y \\ l_3(\tau p+1)(Tp+1) & [p+(c-bD)](\tau p+1)(Tp+1) & 0 & -l_2 l_y \\ 0 & -1 & p & 0 \\ 0 & (b-d) & V & p \end{vmatrix},$$

$$c(p) = \begin{vmatrix} V(p+a)(\tau p+1)(Tp+1) & [-bp+(B-bA)](\tau p+1)(Tp+1) & 0 & 0 \\ VD(\tau p+1)(Tp+1) & [p+(c-bD)](\tau p+1)(Tp+1) & 0 & (\tau p+1)(Tp+1) \\ 0 & -1 & p & 0 \\ -V & (b-d) & V & 0 \end{vmatrix}.$$

Передаточные функции (13) различны по модулю. Меньшие по модулю полюса характерны для медленно затухающих переходных процессов, а большие – для быстро затухающих. Поэтому передаточные функции (13) упрощенно представили в следующем виде:

$$W_M^a(p) \approx \frac{b_0}{\alpha_1 p + a_0}, \quad W_M^y(p) \approx \frac{c_0}{\alpha_1 p + a_0},$$

где $a_0 = AC - BD$; $b_0 = e_1(C + Db) - e_2(B - Ab)$; $c_0 = e_3(Ab - B)$.

Воспользовавшись приведенными выводами и приняв $p = j\omega$, записали выражение (11) с учетом (12) и (13) так:

$$S_a(\omega) = \left| \frac{b_0}{a_1 j\omega + a_0} \right|^2 \cdot \frac{2D_M \alpha C_M (\omega^2 + \alpha^2 + \beta^2)}{\pi (\alpha^2 + \beta^2 - \omega^2)^2 + 4\alpha^2 \omega^2}; \quad (14)$$

$$S_y(\omega) = \left| \frac{c_0}{a_1 j\omega + a_0} \right|^2 \cdot \frac{2D_M \alpha C_M (\omega^2 + \alpha^2 + \beta^2)}{\pi (\alpha^2 + \beta^2 - \omega^2)^2 + 4\alpha^2 \omega^2}, \quad (15)$$

где $S_a(\omega)$ и $S_y(\omega)$ – спектральные плотности выходных показателей культиваторного агрегата в тракторном движении.

Для вычисления интеграла (10) применили метод, изложенный В. В. Солодовниковым¹¹. Сначала представили спектральные плотности (14), (15), приняв $b_0 = x_0$ и $c_0 = x_0$ в следующем виде:

$$S(\omega) = \left| \frac{x_0 \cdot \sqrt{\frac{2D_M \alpha C_M}{\pi}} \cdot (j\omega + \sqrt{\alpha^2 + \beta^2})}{(a_1 j\omega + a_0)(-\omega^2 + \alpha^2 + \beta^2 + 2\alpha j\omega)} \right|^2,$$

и переписали интеграл (10) так:

$$\sigma^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\frac{2D_M \alpha C_M}{\pi} x_0^2 (\omega^2 + \alpha^2 + \beta^2) d\omega}{\left| -a_1 j\omega^2 - (2a_1 \alpha + \alpha_0) \omega^2 + [a_1 (\alpha^2 + \beta^2) + 2a_0 \alpha] j\omega + a_0 (\alpha^2 + \beta^2) \right|^2}.$$

Далее интеграл привели к виду:

$$J_n = \frac{1}{2\pi j} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{G_n(\omega)}{H_n(\omega) H_n(-\omega)} d\omega,$$

¹¹ Солодовников В.В. Статистическая динамика линейных систем автоматического управления. М.: Наука; 1960. 655 с.

где

$$\begin{cases} H_n(\omega) = A_0\omega^n + A_1\omega^{n-1} + \dots + A_n \\ G_n(\omega) = B_0\omega^{2n-2} + B_1\omega^{2n-4} + \dots + B_{n-1} \end{cases} \quad (16)$$

Так как управляемый пропашной агрегат представляет собой устойчивую динамическую систему, все корни $H_n(\omega)$ находятся в верхней полуплоскости. Поэтому при $n = 3$ записали

$$\begin{cases} H_n(\omega) = -a_1j\omega^3 - (2a_1\alpha + a_0)\omega^2 + [a_1(\alpha^2 + \beta^2) + 2a_1\alpha]j\omega + a_0(\alpha^2 + \beta^2) \\ G_n(\omega) = (-1)^3 j \frac{2D_M\alpha C_M x_0^2}{\pi} (\omega^2 + \alpha^2 + \beta^2) \end{cases}, \quad (17)$$

где $a_1 = A + C$.

Сравнивая (26) и (27), получили:

$$\begin{cases} A_0 = -ja_1; \quad A_1 = -(2a_1\alpha + a_0) \\ A_2 = j[a_1(\alpha^2 + \beta^2) + 2a_1\alpha]; \quad A_3 = a_0(\alpha^2 + \beta^2) \\ B_0 = 0; \quad B_1 = -j \frac{2D_M\alpha C_M x_0^2}{\pi}; \quad B_2 = -j \frac{2D_M\alpha C_M x_0^2}{\pi} \cdot (\alpha^2 + \beta^2) \end{cases} \quad (18)$$

Тогда, согласно таблице интегралов [30], значения σ^2 с учетом обозначенных коэффициентов (18) записали следующим образом:

$$\sigma^2 = \frac{B_1 - \frac{A_1 B_2}{A_3}}{\alpha(A_0 A_3 - A_1 A_2)}.$$

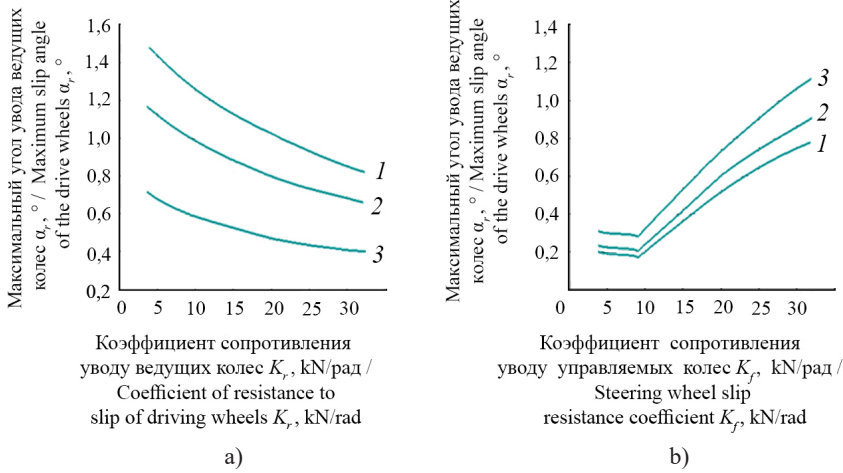
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Задавая разную величину коэффициентов сопротивления боковому уводу управляемых и ведущих колес универсально-пропашного трактора, получили зависимости для расчета максимального угла бокового увода ведущих колес (рис. 2).

Из представленных на рисунке 2 графических зависимостей видно, что с увеличением коэффициента сопротивления уводу ведущих колес максимальный угол увода снижается, а с увеличением коэффициента сопротивления уводу управляемых колес – возрастает.

Воспользовавшись этими данными, можно обосновать допустимую величину указанных коэффициентов сопротивления уводу.

Расчетные среднеквадратические отклонения углов бокового увода колес трактора σ_α и органов культиватора σ_γ (рис. 3) показывают неоднозначное влияние коэффициентов сопротивления боковому уводу ведущих K_r и управляемых K_f колес МЭС на сохранение пропашным агрегатом точности его тракторного движения.



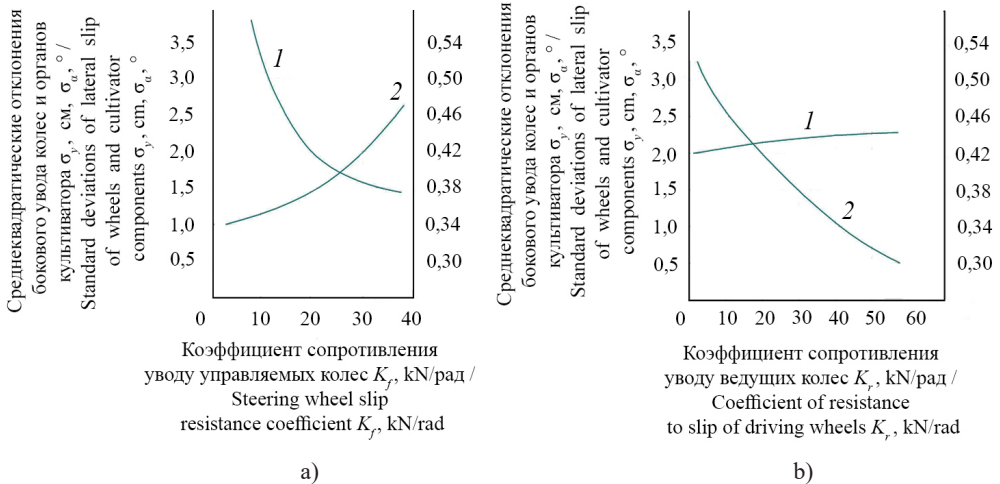
Р и с. 2. Функциональная зависимость максимального угла увода колес трактора класса 1,4 от их коэффициентов сопротивления уводу:

а) ведущих колес; б) управляемых колес:

1 – $K_y = 35$ кН/рад; 2 – $K_y = 25$ кН/рад; 3 – $K_y = 15$ кН/рад

Fig. 2. Functional dependence of the maximum slip angle of the wheels of a class 1.4 tractor on their slip resistance coefficients:

a) driving wheels; b) steered wheels: 1 – $K_y = 35$ кН/рад; 2 – $K_y = 25$ кН/рад; 3 – $K_y = 15$ кН/рад



Р и с. 3. Среднеквадратические отклонения бокового увода колес и органов культиватора трактора класса тяги 1,4 в зависимости коэффициентов сопротивления уводу:

а) управляемых колес; б) ведущих колес: 1 – σ_y ; 2 – σ_α

Fig. 3. Standard deviations of the wheel slip and cultivator

devices of the tractor of traction class 1.4 depending on the coefficients of resistance to slip:

a) driven wheels; b) driving wheels: 1 – σ_y ; 2 – σ_α

Среднеквадратические отклонения углов бокового увода задних ведущих колес трактора преимущественно зависят от коэффициента сопротивления уводу задних колес K_r . Влияние коэффициента сопротивления боковому уводу K_f управляемых передних колес на величину среднеквадратического отклонения бокового увода задних колес трактора менее значительно. Для среднеквадратической величины линейного отклонения рабочих органов культиватора в боковом направлении наоборот преимущественное влияние оказывает сопротивляемость уводу управляемых передних колес трактора.

ОБСУЖДЕНИЕ

Если на величину среднеквадратического углового отклонения ведущих колес МЭС в значительной мере влияет коэффициент сопротивления боковому уводу их шин, а коэффициент сопротивления боковому уводу шин передних колес на их угловое отклонение влияет незначительно, то на величину среднеквадратического линейного отклонения рабочих органов культиватора в боковом направлении существенно влияет сопротивляемость уводу управляемых колес МЭС.

Обоснование величины коэффициента сопротивления боковому уводу ведущих колес трактора K_f базируется на предельно допустимых значениях углов увода этих колес α . Анализ данных предварительных полевых опытов показал, что при качении ведущего колеса трактора класса тяги 1,4 с боковым уводом более $0,8-1^\circ$ наблюдается резкое снижение его тягового КПД. Очевидно, для сохранения тягово-энергетических показателей движителей универсально-пропашного трактора класса тяги 1,4 необходимо за наибольший допустимый предел углов бокового увода α его ведущих колес принимать $\alpha = 1^\circ$.

Отклонение культиваторных рабочих органов от необходимой траектории из условия сохранения корневой системы пропашных культур не должно превышать 4 см. Тогда допустимая величина среднеквадратического отклонения σ рабочих органов культиватора согласно закону нормального распределения составляет при 68 % вероятности 4 см, при 95 % – 2 см.

Для достижения 68 % вероятности отсутствия нарушения в междурядьях защитной зоны ($\sigma_y = 4$ см), на управляемые передние колеса универсально-пропашного трактора Беларусь 80.1 необходимо устанавливать шины с коэффициентом сопротивления уводу K_f не менее 10 кН/рад. Для достижения 95 % вероятности ($\sigma_y = 2$ см) на передние колеса трактора необходимо устанавливать шины с коэффициентом $K_f > 18$ кН/рад, что на подготовленном под посев поле не всегда предоставляется возможным реализовать, так как передние колеса тракторов типа Беларусь 80.1 обычно комплектуются шинами, имеющими $K_f < 17$ кН/рад.

Возможным решением этой задачи может быть комплектация управляемых колес трактора шинами большего размера или другие конструктивные мероприятия, заключающиеся в увеличении бокового сцепления колес с почвой (например, установление на передний мост балласта).

Величина коэффициента сопротивляемости уводу ведущих колес K_r универсально-пропашного трактора, в связи с имеющимся стабилизирующим моментом от культиватора может быть менее 30 кН/рад. Однако вследствие того, что боковая

блокировка навесной системы МЭС может оказаться недостаточной, указанная величина K_r может быть малоэффективной для соблюдения точности траекторного движения. Тогда с учетом реальных значений $K_r \leq 17$ кН/рад предельная минимальная величина K_r должна составлять не менее 30 кН/рад (рис. 3), что дает 95 % вероятности $\alpha \leq 1^\circ$. Указанная величина K_r в связи с возможными боковым скольжением протектора шины по верхнему слою мягкого опорного основания и перемещением так называемой опорной площадки [28] почвы относительно ее более низких слоев может быть обеспечена, если боковая эластичность шин ведущих колес будет ≥ 50 кН/рад, а буксование трактора – $\leq 12\text{--}15$ % при математическом ожидании тягового усилия равного 9 кН, которое чаще всего наблюдается для трактора Беларусь 80.1.

Следовательно, повышение сцепных качеств ведущих колес (увеличение их сопротивляемости боковому уводу на мягкой почве), когда увод происходит за счет и боковой эластичности шин, и бокового скольжения ее протектора, и перемещения опорной площадки, является важным конструктивным фактором, который необходимо учитывать при комплектации шинами трактора тягового класса 1,4 в составе пропашного агрегата.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ работ, посвященных результатам исследований траекторного движения машинно-тракторных агрегатов, показал, что:

– от показателей траекторного движения зависит производительность пропашного агрегата, качество выполнения им междурядной культивации, а также урожайность пропашных культур;

– при исследовании траекторного перемещения пропашного агрегата необходимо рассматривать его как единый объект, а основные характеристики траекторного движения определять путем прямого расчета.

Предлагаемая методика определения характеристик траекторного движения пропашного МТА не противоречит рекомендациям и результатам предыдущих исследований. Она позволяет устанавливать с достаточно высокой точностью необходимые параметры (сопротивляемость боковому уводу) шин для комплектования ведущих и управляемых мостов универсально-пропашного трактора с учетом выполняемой операции и состава агрегата для повышения производительности и снижения повреждаемости растений, что способствует достижению цели исследования.

Результаты полевых испытаний пропашного агрегата ($V = 2,12$ м/с) в составе трактора Беларусь 80.1 на серийных шинах и культиватора КРН-5,6 показали вполне удовлетворительное совпадение результатов экспериментов и аналитических расчетов. Было установлено, что при силе тяги 9,1 кН среднеквадратические значения характеристик траекторного движения имели значения: $\sigma_y = 3,25$ см; $\sigma_\varphi = 1,030$; $\sigma_\alpha = 0,420$; $\sigma_\theta = 2,130$; $\sigma_c = 1,17$ кНм.

Проведенный анализ аналитических и экспериментальных исследований перемещения пропашных агрегатов доказывает необходимость комплектования колес трактора класса 1,4 шинами с рациональной жесткостью в боковом направлении:

управляемых более 18 кН/рад, а ведущих (при их буксовании 12–15 % с тяговым усилием около 9 кН) – не менее 50 кН/рад.

Результаты исследований рекомендуется учитывать при подборе шин для ходовых систем универсально-пропашных тракторов класса тяги 1,4. В дальнейшем необходимо провести исследования на предмет возможности использования предлагаемой в работе методики для определения характеристик тракторного движения машинно-тракторных агрегатов, составленных на базе универсально-пропашных тракторов других классов тяги.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Терновых К.С., Четверова К.С. Состояние и тенденции развития технической базы сельскохозяйственных предприятий. *International Agricultural Journal*. 2022;65(6). https://doi.org/10.55186/25876740_2022_6_6_25
2. Немцев А.Е., Вахрушев В.В., Деменок И.В. Обновление машинно-тракторного парка АПК Сибирского федерального округа. *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 2022;(55):220–222. URL: <https://mechel.belal.by/jour/article/view/726> (дата обращения: 20.08.2025).
3. Годжаев З.А., Прядкин В.И., Колядин П.А., Артемов 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>
4. Kravchenko V., Kravchenko L., Zhurba V., Senkevich S., Duryagina V. Reducing the Dynamic Loading of the Links of the Machine-Tractor Unit Aggregated by the Mobile Power Vehicle of the 1.4 Drawbar Category. In: *Networked Control Systems for Connected and Automated Vehicles: Conference proceedings*. 2023. pp. 2043–2052. https://doi.org/10.1007/978-3-031-11051-1_210
5. Ovchinnikov A.S., Kuznetsov N.G., Nekhoroshev D.D., Gapich G.S., Nekhoroshev D.A., Fomin S.D. и др. Some Ways to Reduce the Dynamic Loads of Agricultural Machine-Tractor Aggregates. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018;13(22):8776–8779. URL: https://www.arpnjournals.org/jeas/research_papers/rp_2018/jeas_1118_7388.pdf (дата обращения: 20.08.2025).
6. Маршанин Е.В., Кузнецов Е.Е., Щитов С.В., Митрохина О.П., Кидяева Н.П., Ковалевский В.Н. Направления исследований для снижения силы сопротивления движению колесного энергетического средства. *Аграрный научный журнал*. 2023;(7):147–152. <https://doi.org/10.28983/asj.y2023i7pp147-152>
7. Nekhoroshev D.D., Nekhoroshev D.A., Konovalov P.V., Popov A.Yu. Research On Experimental Machine-Tractor Aggregates Equipped With Pneumatic Hydraulic Planetary Clutch At Road Works. In: *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2021:012016. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/786/1/012016>
8. Нехорошев Д.А., Нехорошев Д.Д. Исследования процесса разгона МТА с помощью математической модели. *Тракторы и сельхозмашины*. 2013;(7):20–21. <https://doi.org/10.17816/0321-4443-65732>
9. Кравченко В.А. Результаты испытаний машинно-тракторного агрегата на базе трактора класса 1,4 с переменной вращающейся массой двигателя. *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2014;(99):356–371. URL: <http://ej.kubagro.ru/archive.asp?y=2014> (дата обращения: 20.08.2025).
10. Кравченко В.А., Кравченко Л.В., Серегина В.В. Математическая модель машинно-тракторного агрегата с УДМ в трансмиссии трактора. *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного университета*. 2014;(103):251–261. URL: <http://ej.kubagro.ru/archive.asp?y=2014> (дата обращения: 20.08.2025).

11. Сенькевич С.Е. Результаты проведения экспериментальных исследований сельскохозяйственного трактора с упругодемпфирующим механизмом в силовой передаче. *Известия МГТУ «МAMI»*. 2021;(4):49–59. <https://doi.org/10.31992/2074-0530-2021-50-4-49-59>
12. Senkevich S., Bolshev V., Ilchenko E., Chakrabarti P., Jasinski M., Leonowicz Z. и др. Elastic Damping Mechanism Optimization by Indefinite Lagrange Multipliers. *IEEE Access*. 2021;(9):71784–71804. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3078609>
13. Поливаев О.И., Ведринский О.С., Труфанов В.В. Повышение тягово-сцепных и разгонных свойств машинно-тракторного агрегата за счет модернизации приводов ведущих колес. *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. 2017;(4):112–116. <https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2017.4.112>
14. Химченко А.В., Ведринский О.С., Поливаев О.И., Оробинский В.И. Методология оптимизации параметров упругодемпфирующего привода машинотракторного агрегата с помощью имитационной модели. *Наука в центральной России*. 2025;(4):43–53. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2025-4-43-53>
15. Moifar A.M., Shahgholi G., Gilandeh Y.A., Gundoshmian T.M. The Effect of the Tractor Driving System on its Performance and Fuel Consumption. *Energy*. 2020;(202):117803. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117803>
16. Иовлев Г.А., Голдина И.И. Зависимость тяговых свойств трактора от типа соединения с сельскохозяйственной машиной. *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023;17(4):75–81. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-4-75-81>
17. Беляев А.Н., Бурдыкин В.Д., Высоцкая И.А., Тришина Т.В., Новиков А.Е. Устройство для навески машин на трактор. Патент 204692 U1 Российская Федерация. 7 июня 2021. <https://elibrary.ru/qmo1jtj>
18. Посметьев В.И., Савинков М.А., Никонов В.О., Посметьев В.В., Снятков Е.В. Навесная система трактора. Патент 2830434 C1 Российская Федерация. 19 ноября 2024. <https://elibrary.ru/atpjry>
19. Кравченко В.А., Меликов И.М. Влияние бокового увода шин на тягово-энергетические показатели движителя трактора тягового класса 5. *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2021;(170):211–222. <https://doi.org/10.21515/1990-4665-170-012>
20. Belyaev A.N., Shatsky V.P., Kozlov V.G., Trishina T.V., Vysotskaya I.A. Determination of Theoretical Path of Vehicle Motion Upon Cornering. *Journal of Applied Science and Engineering*. 2022;25(5):741–747. [https://doi.org/10.6180/jase.202210_25\(5\).0004](https://doi.org/10.6180/jase.202210_25(5).0004)
21. Беляев А.Н., Шацкий В.П., Тришина Т.В., Высоцкая И.А. Анализ действительной криволинейной траектории движения колесной машины. *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. 2022;15(1):63–70. https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2022_1_63
22. Беляев А.Н., Тришина Т.В., Афоничев Д.Н. Анализ боковых реакций почвы на колесах трактора при повороте. *Resources and Technology*. 2022;19(3):44–56. <https://doi.org/10.15393/j2.art.2022.6363>
23. Беляев А.Н., Шацкий В.П., Гулевский В.А., Тришина Т.В. Оценка бокового отклонения колесной машины от заданной траектории движения. *Сибирский вестник сельскохозяйственной науки*. 2022;52(4):120–128. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2022-4-13>
24. Кравченко В.А., Меликов И.М. Оценка сопротивляемости уводу крупногабаритных шин движителей трактора тягового класса 5. *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного университета*. 2021;(169):191–204. <https://doi.org/10.21515/1990-4665-169-014>
25. Красильников В.Б. Качение колеса по деформируемой поверхности с боковым уводом. *Тракторы и сельхозмашины*. 1966;(6):21–23.
26. Кутков Г.М. Исследование МЭС в составе широкозахватного МТА на возделывании пропашных культур. *Тракторы и сельхозмашины*. 1992;(10):8–10.

27. Беляев А.Н., Оробинский В.И., Гулевский В.А., Тришина Т.В., Высоцкая И.А. Боковые силы на колесах трактора при входе в поворот. *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. 2021;14(2):29–35. https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2021_2_29
28. Беляев А.Н., Афоничев Д.Н., Тришина Т.В., Новиков А.Е., Шередекин П.В., Высоцкая И.А. Влияние жесткости навесной системы на устойчивость криволинейного движения машинно-тракторного агрегата. *Наука в Центральной России*. 2023;(2):115–126. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2023-2-115-126>
29. Беляев А.Н., Оробинский В.И., Тришина Т.В. Повышение устойчивости и управляемости машинно-тракторного агрегата при криволинейном движении: моногр. Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ; 2023. 157 с. <https://elibrary.ru/jhzdwk>
30. Иофинов С.А., Берцовский В.Л. О поворотливости колесного тракторного агрегата. *Тракторы и сельхозмашины*. 1960;(1):8–12.
31. Козлов Д.Г. О движении универсально-пропашного трактора со всеми управляемыми колесами на поворотной полосе поля. *Аграрный научный журнал*. 2016;(1):51–55. <https://elibrary.ru/vlrcbr>
32. Шумилин А.В., Володин А.Н. Метод определения характеристик поворота транспортного средства на недеформируемом основании. *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 1993;(8):17–19.
33. Пархоменко С.Г., Яровой В.Г., Кравченко В.А., Меликов И.М. Шинный тестер. Патент 2085891 С1. Российская Федерация. 27 июля 1997. <https://elibrary.ru/okphzd>
34. Кравченко В.А., Яровой В.Г., Пархоменко С.Г., Меликов И.М., Яровой А.В. Шинный тестер. Патент 2107275 С1 Российская Федерация. 20 марта 1998. <https://elibrary.ru/bbwpyy>
35. Новиков В.В., Поздеев А.В., Еронтаев В.В., Чумаков Д.А., Колесов Н.М., Тимошин Н.В. и др. Экспериментальное определение боковой жесткости пневматического колеса трактора МТЗ-82 «Беларус». *Тракторы и сельхозмашины*. 2023;90(2):123–132. <https://doi.org/10.17816/0321-4443-280225>

REFERENCES

1. Ternovykh K.S., Chetverova K.S. State and Trends of Development of the Technical Base of Agricultural Enterprises. *International Agricultural Journal*. 2022;65(6). (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.55186/25876740_2022_6_6_25
2. Nemtsev A.E., Vakhrushev V.V., Demenok I.V. Renewal of Machine and Tractor Fleet Aic of the Siberian Federal District. *Mechanization and Electrification of Agriculture*. 2022;(55):220–222. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://mechel.belal.by/jour/article/view/726> (accessed 20.08.2025).
3. 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>
4. Kravchenko V., Kravchenko L., Zhurba V., Senkevich S., Duryagina V. Reducing the Dynamic Loading of the Links of the Machine-Tractor Unit Aggregated by the Mobile Power Vehicle of the 1.4 Drawbar Category. In: *Networked Control Systems for Connected and Automated Vehicles: Conference proceedings*. 2023. pp. 2043–2052. https://doi.org/10.1007/978-3-031-11051-1_210
5. Ovchinnikov A.S., Kuznetsov N.G., Nekhoroshev D.D., Gapich G.S., Nekhoroshev D.A., Fomin S.D., et al. Some Ways to Reduce the Dynamic Loads of Agricultural Machine-Tractor Aggregates. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018;13(22):8776–8779. Available at: https://www.arnpjournals.org/jeas/research_papers/rp_2018/jeas_1118_7388.pdf (accessed 20.08.2025).
6. Marshanin E.V., Kuznetsov E.E., Shchitov S.V., Mitrokhina O.P., Kidyayeva N.P., Kovalevsky V.N. Research Directions for Reducing the Resistance Force to Movement of a Wheeled Power Vehicle. *Agrarian Scientific Journal*. 2023;(7):147–152. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.28983/asj.y2023i7pp147-152>

7. Nekhoroshev D.D., Nekhoroshev D.A., Kononov P.V., Popov A.Yu. Research On Experimental Machine-Tractor Aggregates Equipped With Pneumatic Hydraulic Planetary Clutch At Road Works. In: IOP Conference Series Earth and Environmental Science. 2021:012016. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/786/1/012016>
8. Nekhoroshev D.A., Nekhoroshev D.D. Investigation of Acceleration of Machine and Tractor Aggregate Using a Mathematical Model. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2013;(7):20–21. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.17816/0321-4443-65732>
9. Kravchenko V.A. The Results of Machine-Tractor Unit's Tests on the Basis of a 1,4 Tractor Having a Rotary Mass of the Engine. *Polytematic Online Electronic Scientific Journal of the Kuban State Agrarian University*. 2014;(99):356–371. (In Russ., abstract in Eng.) URL: <http://ej.kubagro.ru/archive.asp?y=2014> (access date: 20.08.2025).
10. Kravchenko V.A., Kravchenko L.V., Seregina V.V. Mathematical Model of a Machine and Tractor Unit with Edm in Transmission of a Tractor. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2014;(103):251–261. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <http://ej.kubagro.ru/archive.asp?y=2014> (accessed 20.08.2025).
11. Senkevich S.E. Results of Experimental Studies of an Agricultural Tractor with an Elastic-Damping Mechanism in a Power Train. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2021;(4):49–59. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.31992/2074-0530-2021-50-4-49-59>
12. Senkevich S., Bolshev V., Ilchenko E., Chakrabarti P., Jasinski M., Leonowicz Z., et al. Elastic Damping Mechanism Optimization by Indefinite Lagrange Multipliers. *IEEE Access*. 2021;(9):71784–71804. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3078609>
13. Polivaev O.I., Vedrinsky O.S., Trufanov V.V. Improving the Traction and Acceleration Properties of a Machine-Tractor Unit by Upgrading the Drives of the Driving Wheels. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2017;(4):112–116. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2017.4.112>
14. Khimchenko A.V., Vedrinsky O.S., Polivaev O.I., Orobinsky V.I. Methodology for Optimizing the Parameters of Elastic Damping Drive of a Machine-Tractor Unit Using a Simulation Model. *Science in the Central Russia*. 2025;(4):43–53. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2025-4-43-53>
15. Moifar A.M., Shahgholi G., Gilandeh Y.A., Gundoshmian T.M. The Effect of the Tractor Driving System on its Performance and Fuel Consumption. *Energy*. 2020;(202):117803. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117803>
16. Iovlev G.A., Goldina I.I. Dependence of Tractor Traction Properties on Agricultural Machinery Connections. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023;17(4):75–81. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-4-75-81>
17. Belyaev A.N., Burdykin V.D., Vysotskaya I.A., Trishina T.V., Novikov A.E. [Device for Attaching Devices to on a Tractor]. Patent 204692 U1 Russian Federation. 2021 June 7. (In Russ.) <https://elibrary.ru/qmojtj>
18. Posmetev V.I., Savinkov M.A., Nikonov V.O., Posmetev V.V., Sniatkov E.V. Tractor Hinged System. Patent 2830434 Russian Federation. 2024 November 19. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/atpjry>
19. Kravchenko V.A., Melikov I.M. Effect of the Tire Lateral Skid on Traction and Energy Performance of the Propulsion Unit in the Tractor of Class 5 Traction. *Polytematic Online Electronic Scientific Journal of the Kuban State Agrarian University*. 2021;(170):211–222. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.21515/1990-4665-170-012>
20. Belyaev A.N., Shatsky V.P., Kozlov V.G., Trishina T.V., Vysotskaya I.A. Determination of Theoretical Path of Vehicle Motion Upon Cornering. *Journal of Applied Science and Engineering*. 2022;25(5):741–747. [https://doi.org/10.6180/jase.202210_25\(5\).0004](https://doi.org/10.6180/jase.202210_25(5).0004)
21. Belyaev A.N., Shatsky V.P., Trishina T.V., Vysotskaya I.A. Analysis of the Actual Curvilinear Motion Trajectory of a Wheeled Vehicle. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2022;15(1):63–70. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2022_1_63

22. Belyaev A.N., Trishina T.V., Afonichev D.N. Analysis of Lateral Reactions of Soil on Tractor Wheels when Turning. *Resources and Technology*. 2022;19(3):44–56. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15393/j2.art.2022.6363>
23. Belyaev A.N., Shatsky V.P., Gulevsky V.A., Trishina T.V. Evaluation of the Lateral Deviation of a Wheeled Vehicle from a Given Trajectory. *Siberian Bulletin of Agricultural Science*. 2022;52(4):120–128. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2022-4-13>
24. Kravchenko V.A., Melikov I.M. Assessing the Skid Resistance of the Propulsive Unit Large Tires in a 5 Traction Class Tractor. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2021;(169):191–204. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.21515/1990-4665-169-014>
25. Krasilnikov V.B. [Wheel Rolling along a Deformable Surface with Slip]. *Tractors and Agricultural Machinery*. 1966;(6):21–23. (In Russ.)
26. Kutkov G.M. [Study of MES as Part of a Wide-Cut MTA for Cultivating Row Crops]. *Tractors and Agricultural Machinery*. 1992;(10):8–10. (In Russ.)
27. Belyaev A.N., Orobinsky V.I., Gulevsky V.A., Trishina T.V., Vysotskaya I.A. Lateral Forces on the Wheels of the Tractor at the Entrance to the Turn. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2021;14(2):29–35. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2021_2_29
28. Belyaev A.N., Afonichev D.N., Trishina T.V., Novikov A.E., Sheredekin P.V., Vysotskaya I.A. The Influence of the Rigidity of the Hinged System on the Stability of the Curved Movement of the Machine-Tractor Unit. *Science in Central Russia*. 2023;(2):115–126. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2023-2-115-126>
29. Belyaev A.N., Orobinsky V.I., Trishina T.V. [Enhancement of Stability and Controllability of a Machine-Tractor Unit During Curvilinear Motion]: Monograph. Voronezh: Voronezh State Agricultural University; 2023. 157 p. (In Russ.) <https://elibrary.ru/jhzdwk>
30. Iofinov S.A., Bertsovsky V.L. [On the Maneuverability of Wheeled Tractor Units. *Tractors and Agricultural Machinery*]. *Tractors and Agricultural Machinery*. 1960;(1):8–12. (In Russ.)
31. Kozlov D.G. On Motion of Universal Tractors with All the Steered Wheels on the Headland of the Field. *The Agrarian Scientific Journal*. 2016;(1):51–55. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/vlrabr>
32. Shumilin A.V., Volodin A.N. [Method for Determining the Characteristics of Vehicle Turning on a Non-Deformable Base]. *Tractors and Agricultural Machinery*. 1993;(8):17–19. (In Russ.)
33. Parkhomenko S.G., Yarovoj V.G., Kravchenko V.A., Melikov I.M. Tyre Tester. Patent 2085891 C1 Russian Federation. 1997 July 27. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/okpzhd>
34. Kravchenko V.A., Yarovoj V.G., Parkhomenko S.G., Melikov I.M., Yarovoj A.V. Tire Tester. Patent 2107275 C1 Russian Federation. 1998 March 20. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/bwpyy>
35. Novikov V.V., Pozdeev A.V., Erontayev V.V., Chumakov D.A., Kolesov N.M., Timoshin N.V., et al. Experimental Determination of the Lateral Stiffness of the Pneumatic Wheel of the MTZ-82 «Belarus». *Tractors and Agricultural Machines*. 2023;90(2):123–132. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.17816/0321-4443-280225>

Об авторах:

Кравченко Владимир Алексеевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры техники и технологии пищевых производств Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9152-5851>, Scopus ID: 57204159481, SPIN-код: 99834293, a3v2017@yandex.ru

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

Сергеев Николай Викторович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры эксплуатации и технического сервиса наземных транспортно-технологических средств Азово-Черноморского инженерного института – филиала Донского государственного аграрного университета (347740, Российская Федерация, г. Зерноград, ул. Ленина, д. 21), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0518-8001>, sergeev-n.v@mail.ru

Журба Виктор Викторович, кандидат технических наук, 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

Вклад авторов:

В. А. Кравченко – контроль, лидерство и наставничество в процессе планирования и проведения исследования; формулирование замысла / идеи исследования, целей и задач; осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор данных; создание и подготовка рукописи: написание черновика рукописи.

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

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

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

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 30.06.2025; поступила после рецензирования 06.10.2025;
принята к публикации 26.01.2026*

About the authors:

Vladimir A. Kravchenko, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Food Production Engineering and Technology, Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344003, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-91525851>, Scopus ID: 57204159481, SPIN-code: 9983-4293, a3v2017@yandex.ru

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

Nikolay V. Sergeev, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department Operation and Technical Service of Land Transport and Technological Facilities, Azov-Black Sea Engineering Institute – a branch of the Don State Agrarian University (21 Lenin St., Zernograd 347740, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0518-8001>, sergeev-n.v@mail.ru

Victor V. Zhurba, Cand.Sci. (Eng.), 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

Authors contribution:

V. A. Kravchenko – oversight and leadership responsibility for the research activity planning and execution, including mentorship external to the core team; ideas; formulation or evolution of overarching research goals and aims; c conducting a research and investigation process, specifically performing the experiments and data. collection; preparation, creation and / or presentation of the published work, specifically writing the initial draft.

L. V. Kravchenko – application of statistical, mathematical, computational, or other formal techniques to analyse or synthesize study data; development or design of methodology; preparation, creation and / or presentation of the published work, specifically writing the initial draft (including substantive translation)

N. V. Sergeev – conducting a research and investigation process, specifically performing the experiments and data; preparation, creation and / or presentation of the published work, specifically visualization / data presentation.

V. V. Zhurba – conducting a research and investigation process, specifically performing the experiments and data; preparation, creation and / or presentation of the published work, specifically visualization / data presentation.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 30.06.2025; revised 06.10.2025; accepted 26.01.2026

**ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ /
TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT**<https://doi.org/10.15507/2658-4123.26362.262-276>EDN: <https://elibrary.ru/isrjde>

УДК / UDK 62-18:004.8

*Оригинальная статья / Original article***Структура факторного пространства
как научно-методическая основа обоснования
системы дифференцирования машин****М. Е. Чаплыгин** ✉*Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ,
г. Москва, Российская Федерация, <https://ror.org/05fhdx69>*✉ misha2728@yandex.ru*Аннотация*

Введение. Разработка федеральной системы технологий и машин для растениеводства является важнейшей составляющей программы модернизации агропромышленного комплекса, направленной на обеспечение технологического суверенитета и экономического развития страны. С учетом опыта применения современных тенденций технического прогресса в агропромышленном комплексе должны быть предложены требования к сельскохозяйственной технике в определенном факторном пространстве. В предлагаемой структуре такого пространства человек является разработчиком условий и требований для обеспечения высокоэффективного технологического и технического обеспечения сельскохозяйственного производства.

Цель исследования. Выполнить анализ научно-методических подходов и предложить алгоритм выстраивания структуры факторного пространства при обосновании системы дифференцирования машин для развития инновационных технических средств и производственных процессов в агропромышленном комплексе.

Материалы и методы. Обоснование функционально зависимых блок-факторов выполнено с помощью структурного и функционального анализа. Решение задач планирования оптимального состава машинно-тракторного парка сельскохозяйственных предприятий основано на применении методов оптимизационного и системного подходов.

Результаты исследования. Предложена структура факторного пространства для характеристики дифференцирования машин. Введены и обоснованы дополнительные блок-факторы, имеющие свое назначение, содержание и выходные показатели: Стратегия развития; требования пользователя техники; агросреда и агрофон; комплекс машин; рабочие органы; энергообеспечение; интеллектуальные технологии управления; предиктивные технологии; квалифицированные кадры; машинно-тракторный парк предприятий. Работа предложенного алгоритма показана на примере разработки селекционного комбайна для реализации задач уборки селекционных делянок.

© Чаплыгин М. Е., 2026

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. Блок-факторы взаимосвязаны между собой и различаются степенью своей значимости, которая принимается в качестве исходной информации. Каждая составляющая предложенного алгоритма рассмотрена в соответствии с требованиями Стратегии при достижении показателей продовольственной безопасности Российской Федерации. Представленное исследование является продолжением дискуссии по выбору и оценке перспективных направлений в развитии совершенствования методов обоснования системы машин, в том числе с учетом территориальных признаков. Предложенная структура является универсальной, позволяет решать общепроизводственные научные проблемы со сложными многофакторными задачами, учитывающими современные технологии и разработки с применением достижений в области цифровизации, робототехники и искусственного интеллекта.

Ключевые слова: факторное пространство, интеллектуальная система, предиктивные технологии, база данных, комплексы машин, параметры машины, агросреда


Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Чаплыгин М.Е. Структура факторного пространства как научно-методическая основа обоснования системы дифференцирования машин. *Инженерные технологии и системы.* 2026;36(2):262–276. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.26362.262-276>

The Factor Space Structure as a Scientific and Methodological Basis for Substantiating the System of Differentiation of Machines

M. E. Chaplygin 

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

 *misha2728@yandex.ru*

Abstract

Introduction. An essential component of the program for the modernization of the agro-industrial complex is the development of a federal system of technologies and machines for crop production aimed at ensuring the technological sovereignty and economic development of the country. Taking into account the experience of applying modern trends of technological progress in the agro-industrial complex, there should be proposed the requirements for agricultural machinery in a certain factor space. In the proposed factor space structure, a person is a developer of conditions and requirements for ensuring highly efficient technological and technical support of agricultural production.

Aim of the Study. The study is aimed at analyzing scientific and methodological approaches and proposing an algorithm for creating the factor space structure in substantiating the differentiation system of machines for the development of innovative technical facilities and production processes in the agro-industrial complex.

Materials and Methods. The functionally dependent block-factors were substantiated using the structural and functional analyses. The solution of the tasks of planning the optimal machine and tractor fleet for agricultural enterprises is based on using the methods of optimization and systematic approaches.

Results. There has been proposed the factor space structure to characterize the differentiation of machines. There have been introduced and substantiated additional block-factors, which have their own purpose, content and output indicators: Development strategy; the equipment user requirements; agricultural environment and background; complex of machines; working bodies; power supply; intelligent control technologies; predictive technologies; qualified personnel; machine and tractor fleet of enterprises. The proposed algorithm is shown by the example of the development of a plot combine for harvesting breeding plots.

Discussion and Conclusion. The block-factors are interrelated and differ in the degree of their significance, which is accepted as the initial information. Each component of the proposed algorithm for creating the factor space structure was considered in accordance with the requirements of the Strategy for achieving food security indicators in the Russian Federation. The presented study continues the discussion about the selection and assessment of prospective directions for improving the methods of substantiating the machine system including territorial features. The proposed structure is universal and allows solving general industrial scientific problems of complex multifactorial character taking into account modern technologies and designs and using achievements in the field of digitalization, robotics and artificial intelligence.

Keywords: factor space structure, intelligent system, predictive technologies, database, machine complexes, machine parameters, agricultural environment

Conflict of interest: The author declares that there is no conflict of interest.

For citation: Chaplygin M.E. The Factor Space Structure as a Scientific and Methodological Basis for Substantiating the System of Differentiation of Machines. *Engineering Technologies and Systems*. 2026;36(2):262–276. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.26362.262-276>

ВВЕДЕНИЕ

В практику научных исследований с каждым годом все больше входят идеи аксиоматизации полученных знаний¹ как метода теории познания их организации и обобщения. Это проявляется при аналитическом моделировании различных процессов сельскохозяйственного производства и разработке соответствующих требований в определенном факторном пространстве, т. е. локализованных вокруг определенных систем аксиом². Под системой факторного пространства применительно к сельскохозяйственной технике следует понимать множество параметров машины, окружающей среды и обрабатываемого материала, значения и величины которых можно исследовать и проанализировать. Такое понимание целесообразно для обоснования современных объектов сельскохозяйственного назначения, в том числе для определения экономической устойчивости

¹ Жалнин Э.В. Аксиоматизация земледельческой механики: (начальные положения). М.: Институт технических обеспечения сельского хозяйства – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»; 2019. 268 с. <https://elibrary.ru/tuwkbu>

² Жалнин Э.В., Пастухов А.Г., Бахарев Д.Н. Краткая история развития земледельческой механики. В: Интеллектуальные системы в аграрном и строительном комплексе: сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф. Орел: Орловский гос. аграрный ун-т. им. Н. В. Парахина; 2024. С. 181–187. <https://elibrary.ru/cakiar>; Жалнин Э.В., Пастухов А.Г., Бахарев Д.Н. Аксиоматизация земледельческой механики как методология научно-исследовательской деятельности. Белгород: Белгородский ГАУ им. В. Я. Горина; 2023. 262 с. <https://elibrary.ru/qrxasa>

сельскохозяйственных предприятий в условиях наличия рисков. Требования факторного пространства направлены на повышение технического уровня машин [1; 2]. Они регламентируют разработку концептуальных положений при проектировании новой техники [3; 4], оценке покупательной способности, расширении функциональных возможностей и выборе сельхозтоваропроизводителем нужной экономически рентабельной техники.

Наиболее распространенным факторным пространством является «триада» факторов, предложенная В. П. Горячкиным. Однако в последние десятилетия развития сельскохозяйственного производства выявлена недостаточность такого подхода, так как для обоснования целесообразности создания той или иной машины и ее конструктивных и технологических параметров необходимо иметь информацию по многим другим смежным вопросам и, следовательно, учитывать новые факторы. Данное обстоятельство диктует необходимость расширения факторного пространства, в котором проходит обоснование современных объектов сельскохозяйственного назначения. Технологические, технические, экономические, коммерческие и другие аспекты функционирования машин нельзя определить и всесторонне оценить, ограничиваясь исследованием взаимодействия какого-либо орудия с почвой, растением, сельскохозяйственным сырьем при различных энергоисточниках.

Разрабатываемые технологии и машины [5] для посева, уборки, транспортировки и послеуборочной обработки выращенного урожая, входящие в федеральную «Систему машин и технологий для комплексной механизации и автоматизации сельскохозяйственного производства на период до 2020 года»³ [6], учитывают разнообразие агроклиматических зон страны. Для производства качественной продукции подобраны рациональные технологии посредством экономико-математического моделирования [7] и оптимальные варианты комплексов машин. Такие комплексы должны обеспечивать возможность выполнять технологический процесс с применением интеллектуальных систем мониторинга, управления и диагностики, что позволит повысить производительность всего машинно-тракторного парка (МТП). При разработке экономико-математической модели необходимо выявить, какие внешние и внутренние ограничения определяют оптимальные условия функционирования выбранного объекта исследования, какие из рассматриваемых факторов будут являться определяющими и какие требования должны предъявляться к модели, чтобы обеспечить ее адекватность.

Цель исследования – провести анализ научно-методических подходов и предложить алгоритм формирования структуры факторного пространства для развития инновационных технических средств и производственных процессов в агропромышленном комплексе с применением достижений в области цифровизации, робототехники и искусственного интеллекта.

³ Лачуга Ю.Ф., Горбачев И.В., Ежевский А.А., Измайлов А.Ю., Кряжков В.М., Антышев Н.М. и др. Система машин и технологий для комплексной механизации и автоматизации сельскохозяйственного производства на период до 2020 года. Т. 1. М.: ВИМ; 2012. С. 278–284.

Для решения задач, связанных с построением и обоснованием структуры факторного пространства, служащей основой при обосновании системы дифференцирования машин, требуется учет новых концептуальных разработок для региона и страны в целом [6; 8], научная парадигма и методический подход.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В разработанных до начала XX века В. П. Горячкиным основных постулатах, в числе которых находится «триада», общие теоретические основы технологических процессов рассмотрены как единая система, объединяющая следующие факторы: физико-механические свойства обрабатываемого материала (почва, растения и др.), рабочего органа и источника энергии⁴. «Оценить какой-либо процесс возможно только при учете всех трех указанных элементов», – писал ученый. Это утверждение во многом было оправданным, и данное положение послужило фундаментальной основой научно-исследовательской работы в сфере механизации сельскохозяйственного производства. Такие факторы, как машины, агросреда и агрофон, источник энергии предопределили направление дальнейших исследований: к имеющемуся источнику энергии научно-обоснованно рассчитывали оптимальные параметры машины.

Для решения задач по техническому обеспечению всех производственных процессов в сельскохозяйственном производстве на сегодняшний день фундаментальных научных положений, предложенных академиком, оказалось недостаточно. Указанные факторы, составляющие «триаду» применительно к разным исследуемым объектам сельскохозяйственного назначения, поменяли свою значимость и место. Для современного рынка сельскохозяйственных машин⁵ применима следующая схема: к выпускающемуся агрегату любой модели и производителя можно подобрать из модельной линейки необходимый источник энергии (двигатель). Ранее подбирали агрегат с соответствующими параметрами к источнику энергии.

Согласно положениям, выдвигаемым академиком Горячкиным, во многих отраслях сельскохозяйственного машиностроения, например, в тракторо- и комбайностроении, первоочередным фактором являются машины. Далее следуют агросреда и агрофон, а потом источник энергии. В то же время для обеспечения эффективности сельскохозяйственного производства при решении современных задач, направленных на обоснование МТП, роль такого фактора, как агросреда и агрофон приобретает первостепенное значение. Существующие системы, которые формируют факторное пространство как основу научно-методического приема, являются малоэффективными, и переход к следующему этапу с учетом огромного разнообразия объектов сельскохозяйственного назначения возможен только при условии, что будет предложен новый метод в виде алгоритма для обоснования системы дифференцирования машин.

⁴ Жалнин Э.В. Аксиоматизация земледельческой механики: (начальные положения).

⁵ Жалнин Э.В. Октетная система факторного пространства – методическая основа обоснования системы машин разного уровня. В: Интеллектуальные машинные технологии и техника для реализации Государственной программы развития сельского хозяйства: сб. научных докладов Междунар. науч.-техн. конф. М.: ФГБНУ ФНАЦ ВИМ; 2015. С. 167–171. <https://elibrary.ru/ufoigv>

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Обоснование функционально зависимых блок-факторов для предлагаемого алгоритма формирования структуры факторного пространства выполнено с помощью структурного и функционального анализа. Реализация предложенного алгоритма предполагает последовательное выполнение поставленных в исследовании задач, связанных между собой блок-факторами.

При решении задач планирования технического обеспечения всех производственных процессов для сельскохозяйственных предприятий применялись методы оптимизационного и системного подхода. Исследования по предложенному алгоритму формирования структуры факторного пространства должны быть формализованы, качественно оценены и проводиться с применением программно реализованной иерархической системы экономико-математических моделей.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Научно-обоснованные структура парка машин для сельскохозяйственных предприятий и формирование федеральной системы технологий и машин для растениеводства, в том числе и по территориальным признакам, начиная с района и заканчивая масштабом страны, являются сложными многофакторными задачами. Для решения такого рода задач предложен алгоритм построения структуры факторного пространства.

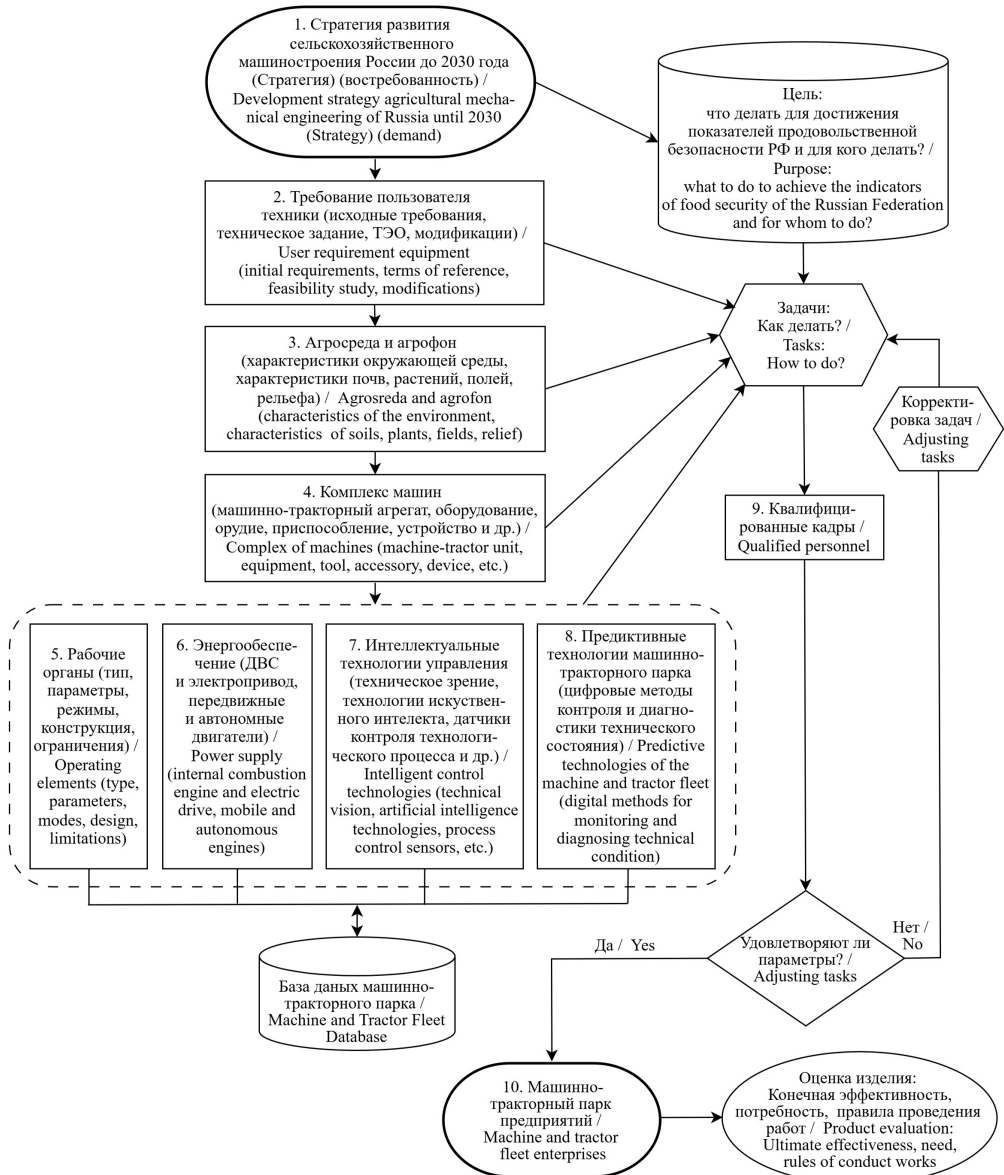
В отличие от ранее предложенной системы⁶, в ее структуру введены и обоснованы дополнительные блок-факторы, обеспечивающие логическое развитие научно-методического обоснования современной системы технологий и машин. Каждый блок-фактор, входящий в алгоритм формирования структуры факторного пространства для предлагаемой системы дифференцирования машин, имеет свое назначение, содержание и выходные показатели (рис. 1).

Первый блок-фактор – стратегия развития сельскохозяйственного машиностроения России до 2030 года⁷ (далее – Стратегия) – является программным документом, характеризующим состояние отрасли сельскохозяйственного машиностроения и определяющим основные принципы государственной политики в области сельского хозяйства, формирует задачи на среднесрочную и долгосрочную перспективы. Стратегия нацелена на достижение показателей в соответствии с Доктриной продовольственной безопасности Российской Федерации⁸, в части развития современной конкурентоспособной высокотехнологичной техники российского производства, обеспечения модернизации сельского хозяйства, увеличения выпуска сельскохозяйственных машин.

⁶ Жалнин Э.В. Октетная система факторного пространства – методическая основа обоснования системы машин разного уровня.

⁷ О Стратегии научно-технологического развития Федерации: Указ Президента РФ от 28 февраля 2024 № 145. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/408518353/> (дата обращения: 22.03.2025).

⁸ Об утверждении Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации: Указ Президента РФ от 21 января 2020 №20 [Электронный ресурс]. <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/73338425> (дата обращения: 10.10.2025).



Р и с. 1. Алгоритм формирования структуры факторного пространства для обоснования системы дифференцирования машин

F i g. 1. The algorithm for forming the factor space structure to substantiate the machine differentiation system

Источник: рисунок 1 составлен автором в программе draw.io Diagram.
Source: figure 1 was compiled by author in the program draw.io Diagram.

В представленном алгоритме фактор Стратегии является новым, ранее он был реализован как социальный заказ⁹, представляющий механизм сотрудничества государства с частными партнерами и отражающий потребность заказчика, инвестора в том или ином техническом изделии, объекте сельскохозяйственного назначения, результате интеллектуального труда человека. Первый блок-фактор Стратегии определяет задачу: что нужно делать для обеспечения продовольственной безопасности страны и для кого делать.

Примером реализации Стратегии может служить разработка системы технологий и машин, которая позволит повысить производительность применяемой техники в 1,5–2,0 раза, снизить себестоимость работ на 30 %, привести к экономии трудозатрат на 20 % по сравнению с предшествующим аналогом. В качестве примера также может выступать разработка мобильного энергосредства 3 класса с резиноармированным гусеничным движителем; перспективной модели зерноуборочного комбайна 5 и 7 классов с интеллектуальной системой управления; селекционного комбайна с электроприводом базовых рабочих органов и трансмиссии с пропускной способностью молотилки до 1,0 кг/с [4; 5] и др.

Второй блок-фактор – требование пользователя техники разрабатывать условия и показатели эффективности технических средств на основании Стратегии. Результатом реализации этого элемента является разработка нормативных документов на технику (исходные требования, техническое задание, функциональная, технологическая и компоновочная схемы планируемой разработки), а также ее последующая модернизация. Блок определяет содержание на каждом этапе реализации запланированных научно-исследовательских работ, их четкую последовательность и конечные результаты, исходя из поставленной цели. Наблюдение за природными объектами и вторжение в них рабочими органами заменяется целенаправленными воздействиями на обрабатываемый материал (почву) биомашсистемами (системы взаимодействия человека, машины и живого для достижения определенных целей) [9; 10]. Человеку в данной структуре уделяется роль руководителя и генератора идей в общем процессе разработки.

Начальные составляющие предлагаемой структуры факторного пространства определяют общую направленность (рыночную, государственную и др.) дальнейших действий, объединенных в блок-факторы. Учитываются инновационный процесс, предметность, эффективность и динамизм развития разработки. От Стратегии развития сельскохозяйственного машиностроения в области техники и технологий зависит содержание последующих элементов. Условия и требования к разрабатываемым машинам задаются именно человеком, как генератором идей. Система дифференцирования машин по техническим и технологическим параметрам или критериям подразумевает под собой алгоритм действий с определенными уровнями реализации по мобильности, производительности, энергоемкости, энерговооруженности, эргономичности, надежности и др. [11]. Например, указывается расположение места, где территориально проводится исследование (район, область,

⁹ Жалнин Э.В. Октетная система факторного пространства – методическая основа обоснования системы машин разного уровня.

регион)¹⁰. Обязательно описываются характеристики климата, почв, возделываемых культур, рельефа местности, севооборота. Для почвообрабатывающего агрегата это показатели почвы (тип, влажность, твердость, плотность и др.), для уборочного агрегата – культура, сорт, соломистость, влажность, соотношение зерна к соломе, урожайность и др. Все это отражается в техническом задании [6].

Третий блок-фактор – агросреда и агрофон, которые конкретизируют и раскрывают второй блок. На важность характеристик «агросреды» указывал В. П. Горячкин, утверждая, что любое серьезное исследование надо начинать с изучения физико-механических свойств почвы, растений, продуктов урожая и др. Эти факторы являются обобщенным определением условий, в которых должна эксплуатироваться планируемая разработка. Характеристики «агросреды» и «агрофона» должны быть представлены в аналитическом виде статистических законов распределения, математических ожиданий и формализованы должным образом.

Четвертый блок-фактор – комплекс машин, в который объединены оборудование, орудие, приспособление, устройство, машинно-тракторный агрегат и др. Отметим, что работа входящих в комплекс машин с научно-обоснованными параметрами имеет ряд особенностей функционирования. В технологии уборочных работ примером реализации может служить уборочно-транспортный комплекс. Такой комплекс состоит из зерноуборочного комбайна и грузового автомобиля. Технические и технологические параметры комбайна должны быть увязаны с грузоподъемностью и объемом кузова автомобиля. Вопросы в этом блоке решаются путем взаимодействия параметров машин (оборудования, орудий, приспособлений, устройств, тракторов, комбайнов и др.), которые задействованы в комплексе и функционально связаны между собой единым технологическим процессом, рассматриваются как совокупность рабочих органов [11], с применением достижений в области цифровизации, робототехники и искусственного интеллекта.

Пятый блок-фактор – рабочие органы. В этом блоке рассматриваются детали и узлы (рабочие органы) разрабатываемого изделия (машины), с помощью которых производится воздействие на агросреду¹¹. Пример – корпус плуга, режущий аппарат, мотовило, молотильный барабан, очистка комбайна.

Шестой блок-фактор – энергообеспечение. Понятие энергообеспечения является комплексным и подразумевает предоставление потребителю всех видов требуемых энергетических затрат, необходимых для функционирования разрабатываемого объекта сельскохозяйственного назначения со снабжением его необходимым источником энергии, исходя из имеющегося типоразмерного ряда.

Седьмой блок-фактор – интеллектуальные технологии управления. Этот блок учитывает применение в проектируемых и разрабатываемых машинах адаптивной системы управления, использующей техническое зрение и технологии искусственного интеллекта [12]. В машинах применяются датчики контроля

¹⁰ Лачуга Ю.Ф., Горбачев И.В., Ежевский А.А., Измайлов А.Ю., Кряжков В.М., Антышев Н.М. и др. Система машин и технологий для комплексной механизации и автоматизации сельскохозяйственного производства на период до 2020 года.

¹¹ Жалнин Э.В. Октетная система факторного пространства – методическая основа обоснования системы машин разного уровня.

технологического процесса и адаптивные системы регулировки рабочих органов для достижения высокой производительности. Качество получаемой продукции также будет находиться на высоком уровне согласно предъявляемым к ней нормативным требованиям [13–15].

Восьмой блок-фактор – предиктивные технологии машинно-тракторного парка. Блок учитывает применение цифровых методов контроля и диагностики технического состояния в системах МТП за счет применения телематических и предиктивных технологий технического состояния и современных средств диагностики мониторинга технического сервиса агрегатов [16; 17]. Данный блок является базой данных МТП: здесь учитываются известный перечень выпускаемой предприятиями сельскохозяйственного машиностроения техники, ее характеристики, как технические, так и технологические. Накопленный объем информации по комплексу машин и производственным факторам предприятия составляет основу для проектирования оптимального состава машинно-тракторного парка¹².

Девятый блок-фактор – квалифицированные кадры. Рассматривается наличие кадров высшей квалификации, как необходимый ресурс и условие функционирования любого предприятия, особенно в условиях современных изменений в требованиях к профессиональным знаниям на фоне научно-технического прогресса. Для реализации алгоритма структуры на каждом этапе в блоках учитываются агрономы, механизаторы, испытатели [18].

Десятый блок-фактор – машинно-тракторный парк предприятий. Совокупность информации по комплексу машин и производственным факторам хозяйства составляет МТП, учитывающий объемы посевных площадей, возделываемые культуры, структуру севооборота, агротехнические сроки выполнения работ, расстояние перевозки грузов и др. Содержит необходимую информацию для разработки технологических карт производства сельскохозяйственных культур. Для каждого хозяйства МТП индивидуален. Расчет оптимальной структуры и состава парка сельскохозяйственного предприятия называется решением оптимизационной задачи, критерием которой является производительность и себестоимость выполнения работ. Для ее реализации используют экономико-математические методы. Состав машин и тракторов и их возможное сочетание имеет большое количество вариантов, поэтому простой их перебор и выбор наилучшего варианта практически невозможен.

Предложенный алгоритм работает следующим образом: если необходимо разработать селекционный комбайн для реализации задач уборки делянок на 3-м и 4-м этапах в селекции зерновых культур, исходя из положений Стратегии ставится цель по разработке данного агрегата на указанных по запросам селекционных центров этапах селекционных работ. Далее разрабатываются требования на селекционный комбайн (исходные требования, техническое задание, технико-экономическое обоснование и др.) и описываются конкретные задачи для выполнения поставленной цели. После этого начинается изучение характеристик окружающей среды, типов

¹² Жалнин Э.В. Октетная система факторного пространства – методическая основа обоснования системы машин разного уровня.

почв, растений, оказывающих прямое влияние на выполнение технологического процесса уборки селекционных делянок.

Следующим этапом определяется машинно-тракторный агрегат – селекционный комбайн. При реализации поставленных целей и задач комбайн комплектуется перспективными конструктивными решениями рабочих органов с гидравлическим, или электрическим приводами, схемой энергообеспечения и узлами для выполнения технологического процесса, исключая смешивание семенного материала при переходе с одной делянки на другую. В зависимости от потребностей заказчика и внедрения в его существующую технологию перспективных инноваций, разрабатываемый комбайн дополнительно может комплектоваться интеллектуальными технологиями управления и предиктивными цифровыми методами контроля и диагностики технического состояния. Немаловажным фактором является и наличие в данном селекционном центре квалифицированных механизаторов, которые будут работать на данном комбайне. Использование в технике такого рода технологий требует наличия в штате специалистов. Для качественного выполнения заложенных в разрабатываемый комбайн параметров и функций в алгоритме предусмотрено использование базы данных, где для каждого рассмотренного блока факторного пространства имеется свой уникальный набор данных с возможностью их дополнения и совершенствования. Не исключены ситуации, когда селекционера не будут удовлетворять параметры, заложенные в комбайн. В этом случае в алгоритме предусмотрен блок «корректировка задач», который способен скорректировать разработку под требуемые параметры на любом этапе выполнения поставленной задачи. Если результат получается удовлетворительным, из разработанного селекционного комбайна формируется уборочный парк селекционного центра с оценкой его эффективности.

ОБСУЖДЕНИЕ

На основании выполненного анализа научно-методических подходов сформированы обоснованные в структуре факторного пространства блок-факторы, которые взаимосвязаны между собой, различаются степенью своей значимости и способствуют развитию инновационных технических средств, производственных процессов в агропромышленном комплексе. Проанализированы факторы и предложен алгоритм формирования структуры факторного пространства обоснования системы дифференцирования машин в соответствии с требованиями Стратегии при достижении показателей продовольственной безопасности Российской Федерации.

Стратегия в предложенном алгоритме является новым фактором, который не был формализован должным образом. Ранее он был реализован как социальный заказ¹³, представляющий механизм сотрудничества государства с частными партнерами (лицами или группы лиц, принимающих решения). Через социальный заказ посредством разработки нормативных документов в виде постановлений, приказов, указов или целевых программ государство реализует социальные обязательства

¹³ Жалнин Э.В. Октетная система факторного пространства – методическая основа обоснования системы машин разного уровня.

перед гражданами, привлекая негосударственные организации (исполнителей услуг). Заказ такого рода должен доводиться до исполнителей с конкретным результатом и определять задачу: что нужно делать для обеспечения продовольственной безопасности страны и для кого делать.

Наряду с очевидными преимуществами применения разработанного алгоритма формирования структуры факторного пространства для обоснования системы дифференцирования машин имеются также слабые стороны и ограничения, связанные с зависимостью от точности входных данных и возможностью ошибок и некорректных результатов при реализации поставленных задач.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование является продолжением дискуссии по выбору и оценке перспективных направлений в развитии совершенствования методов обоснования системы машин для агропромышленного комплекса. Формирование системы машин, технологий и структуры парка машин для растениеводства, в том числе с учетом территориальных признаков, является общепроизводственной научной проблемой со сложными многофакторными задачами, учитывающими современные технологии и разработки с применением достигнутого технического уровня и апробированных технологий в области цифровизации, робототехники и искусственного интеллекта на ближайшую перспективу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чаплыгин М.Е., Давыдова С.А., Подзоров А.В. Современные требования к техническому уровню зерноуборочных комбайнов. *Технический сервис машин*. 2020;(4):29–39. <https://doi.org/10.22314/2618-8287-2020-58-4-29-39>
2. 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>
3. Чаплыгин М.Е., Беспалова О.Н., Кадыргалиев А.З. Концептуальные положения технологии производства зерновых культур для селекционных работ с помощью цифровых методов. *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование*. 2024;(4):419–429. URL: <https://www.volgau.com/izvestiya> (дата обращения: 25.08.2025).
4. Чаплыгин М.Е., Старостин И.А., Овчаренко А.С. Концептуальные основы создания электрического селекционного комбайна с комбинированной энергетической установкой. *Инженерные технологии и системы*. 2025;35(2):266–283. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202502.266-283>
5. Лобачевский Я.П., Лачуга Ю.Ф., Измайлов А.Ю., Шогенов Ю.Х. Научно-технические достижения агроинженерной науки в условиях цифровизации сельского хозяйства. *Российская сельскохозяйственная наука*. 2025;(3):45–53. <https://elibrary.ru/fedqxj>
6. Коротчен В.М., Ценч Ю.С., Лобачевский Я.П. Система машин как фактор научно-технического прогресса в агропромышленном комплексе. *Российская сельскохозяйственная наука*. 2024;(4):67–72. <https://elibrary.ru/fkrban>
7. Жалнин Э.В. Системно-аналитический метод формирования технической политики в АПК РФ. *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 2012;(6):3–9. URL: <https://journals.eco-vector.com/0321-4443/issue/view/3806> (дата обращения: 25.08.2025).

8. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П. Система машин и технологий для комплексной механизации и автоматизации сельскохозяйственного производства на период до 2020 года. *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2013;(6):6–10. <https://elibrary.ru/rvtbhj>
9. Черноиванов В.И., Толоконников Г.К., Ранцева И.В. Структура подсистем в биомашсистемах. *Техника и оборудование для села*. 2019;(7):2–7. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2019-7-2-7>
10. Черноиванов В.И., Толоконников Г.К. Функциональная схема биомашсистемы. *Техника и оборудование для села*. 2022;(10):2–5. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2022-10-2-5>
11. Черноиванов В.И., Толоконников Г.К. Системный подход для агропромышленного комплекса. *Техника и оборудование для села*. 2021;(12):2–6. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2021-12-2-6>
12. 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>
13. Zhang P., Guo Z., Ullah S., Melagraki G., Afantitis A., Lynch I. Nanotechnology and Artificial Intelligence to Enable Sustainable and Precision Agriculture. *Nature Plants*. 2021;(7):864–876. <https://doi.org/10.1038/s41477-021-00946-6>
14. Kumar P., Singh A., Rajput V.D., Yadav A.K.S., Kumar P., Singh A.K. и др. Role of Artificial Intelligence, Sensor Technology, Big Data in Agriculture: Next-Generation Farming. *Bioinformatics in Agriculture*. 2022:625–639. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-89778-5.00035-0>
15. Sparrow R., Howard M., Degeling C. Managing the Risks of Artificial Intelligence in Agriculture. *NJAS Impact in Agricultural and Life Sciences*. 2021;93(1):172–196. <https://doi.org/10.1080/27685241.2021.2008777>
16. Ерохин М.Н., Дорохов А.С., Катаев Ю.В. Интеллектуальная система диагностирования параметров технического состояния сельскохозяйственной техники. *Агроинженерия*. 2021;(2):45–50. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-2-4550>
17. Дорохов А.С., Катаев Ю.В., Пестряков Е.В., Петрищев Н.А., Саяпин А.С., Костомахин М.Н. Применение нейронной сети в управлении техническим состоянием сельскохозяйственной техники. *Вестник машиностроения*. 2025;104(8):663–667. <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2025-104-8-663-667>
18. Кот Е.М., Петрякова С.В., Малькова Ю.В., Пильникова И.Ф., Горбунова О.С. Формирование кадрового потенциала в АПК. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2022;(4):141–144. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.118.4.137>

REFERENCES

1. Chaplygin M.E., Davydova S.A., Podzorov A.V. Modern Requirements for the Technical Level of Combine Harvesters. *Machinery Technical Service*. 2020;(4):29–39. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.22314/2618-8287-2020-58-4-29-39>
2. 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>
3. Chaplygin M.E., Bepalova O.N., Kadyrgaliev A.Z. Conceptual Provisions of Grain Production Technology for Selection Works Using Digital Methods. *Proceedings of Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Education*. 2024;(4):419–429. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://www.volgau.com/izvestiya> (accessed 25.08.2025).
4. Chaplygin M.E., Starostin I.A., Ovcharenko A.S. Conceptual Basis for Developing Electric Plot Combine Harvester with Combined Power-Generating Plant. *Engineering Technologies and Systems*. 2025;35(2):266–283. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202502.266-283>

5. Lobachevsky Ya.P., Lachuga Yu.F., Izmailov A.Yu., Shogenov Yu.Kh. Scientific and Technical Achievements of Agro-Engineering Science in the Conditions of Digitalization of Agriculture. *Rossiiskaia selskokhoziaistvennaia nauka*. 2025;(3):45–53. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/fedqjx>
6. Korotchenya V.M., Tsench Yu.S., Lobachevsky Ya.P. The Machine System as a Factor of Scientific and Technological Progress in Agro-Industrial Complex. *Rossiiskaia selskokhoziaistvennaia nauka*. 2024;(4):67–72. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/fkrban>
7. Zhalnin E.V. Systemic and Analytical Method for the Formation of Technological Policy in the Agro-Industrial Sector of Russian Federation. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2012;(6):3–9. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://journals.eco-vector.com/0321-4443/issue/view/3806> (accessed 25.08.2025).
8. Izmailov A.Yu., Lobachevsky Ya.P. [A System of Machines and Technologies for Complex Mechanization and Automation of Agricultural Production for the Period up to 2020]. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2013;(6):6–10. (In Russ.) <https://elibrary.ru/rvtbhj>
9. Chernoi vanov V.P., Tolokonnikov G.K., Rantseva I.V. Subsystem Structure in Biological Machine Systems. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2019;(7):2–7. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2019-7-2-7>
10. Chernoi vanov V.I., Tolokonnikov G.K. Functional Scheme of the Biomachine System. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2022;(10):2–5. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2019-7-2-7>
11. Chernoi vanov V.I., Tolokonnikov G.K. A Systematic Approach for the Agricultural Sector. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2021;(12):2–6. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2019-7-2-7>
12. 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>
13. Zhang P., Guo Z., Ullah S., Melagraki G., Afantitis A., Lynch I. Nanotechnology and Artificial Intelligence to Enable Sustainable and Precision Agriculture. *Nature Plants*. 2021;(7):864–876. <https://doi.org/10.1038/s41477-021-00946-6>
14. Kumar P., Singh A., Rajput V.D., Yadav A.K.S., Kumar P., Singh A.K., et al. Role of Artificial Intelligence, Sensor Technology, Big Data in Agriculture: Next-Generation Farming. *Bioinformatics in Agriculture*. 2022:625–639. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-89778-5.00035-0>
15. Sparrow R., Howard M., Degeling C. Managing the Risks of Artificial Intelligence in Agriculture. *NJAS Impact in Agricultural and Life Sciences*. 2021;93(1):172–196. <https://doi.org/10.1080/27685241.2021.2008777>
16. Erokhin M.N., Dorokhov A.S., Kataev Yu.V. Intelligent System for Diagnosing the Parameters of the Technical Condition of Tractors. *Agricultural Engineering*. 2021;(2):45–50. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-2-4550>
17. Dorokhov A.S., Kataev Yu.V., Pestryakov E.V., Petrishchev N.A., Sayapin A.S., Kostomakhin M.N. Application of a Neural Network in Control of Technical Condition of Agricultural Machinery. *Vestnik mashinostroeniya*. 2025;104(8):663–667. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2025-104-8-663-667>
18. Kot E.M., Petryakova S.V., Malkova Yu.V., Pilnikova I.F., Gorbunova O.S. Formation of Human Resources in the Agro-Industrial Complex. *International Research Journal*. 2022;(4):141–144. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.118.4.137>

Об авторе:

Чаплыгин Михаил Евгеньевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией технологий и машин для посева и уборки зерна и семян в селекции и семеноводстве Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская

Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0031-6868>, Researcher ID: AAZ-6056-2020, Scopus ID: 57211741695, SPIN-код: 2268-6927, misha2728@yandex.ru

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

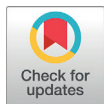
*Поступила в редакцию 16.02.2026; поступила после рецензирования 19.03.2026;
принята к публикации 26.03.2026*

About the author:

Mikhail E. Chaplygin, Cand.Sci. (Eng.), Leading Researcher, Head of the Laboratory Technologies and Machines for Sowing and Harvesting Grain and Seeds, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5 1st Institutsky Passage, Moscow 109428, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0031-6868>, Researcher ID: AAZ-6056-2020, Scopus ID: 57211741695, SPIN-code: 2268-6927, misha2728@yandex.ru

The author has read and approved the final manuscript.

Submitted 16.02.2026; revised 19.03.2026; accepted 26.03.2026

**ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ /
TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT**<https://doi.org/10.15507/2658-4123.26362.277-299>EDN: <https://elibrary.ru/lqqmgi>

УДК / UDK 62-112.6:636.085.55

*Оригинальная статья / Original article***Определение рациональных параметров барабанного дозатора малогабаритного комбикормового агрегата по результатам экспериментальных исследований****С. Ф. Вольвак¹✉, А. Г. Пастухов¹, Д. Н. Бахарев²,
Е. П. Тимашов¹, И. А. Кощаев¹**¹ *Белгородский государственный аграрный университет имени В. Я. Горина,**п. Майский, Российская Федерация, <https://ror.org/00nf68x61>*² *Луганский государственный университет имени Владимира Даля,**г. Луганск, Российская Федерация*✉ volvak.s@yandex.ru*Аннотация*

Введение. Разработка конструкции многокомпонентного барабанного дозатора малогабаритного агрегата для приготовления рассыпного комбикорма высокого качества из собственного зернофуража и промышленных добавок в условиях фермерских и личных хозяйств населения является весьма актуальной. Она направлена на решение проблемы обеспечения экономного расходования, соблюдения пропорций, точности дозирования и приготовления сбалансированного по питательности полнорационного рассыпного комбикорма.

Цель исследования. Разработка конструкции и экспериментальное определение рациональных конструктивно-технологических параметров многокомпонентного барабанного дозатора сыпучих компонентов рассыпного комбикорма для малогабаритного комбикормового агрегата.

Материалы и методы. Для определения рациональных конструктивно-технологических параметров применяли методы определения объемной массы и средневзвешенного диаметра частиц, оценки функциональных показателей, расчета и оценки погрешности производительности, однофакторного экспериментального исследования, обработки результатов измерений. Использовали влагомер «Wile-65», пурку ПХ-1МЦ, весы CAS MWP-3 000, весы MASTer MS-10, комплект измерительный K505, секундомер СОСпр-26-2, тахометр ТЧ 10-Р.

Результаты исследования. Определены рациональные конструктивно-технологические параметры пятикомпонентного барабанного дозатора при удельной энергоёмкости процесса дозирования в среднем 0,2 кВт·ч/т со средней производительностью:

© Вольвак С. Ф., Пастухов А. Г., Бахарев Д. Н., Тимашов Е. П., Кощаев И. А., 2026

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

для пшеницы – 111,3 кг/ч; сои – 47,4 кг/ч; добавок – 36,7 кг/ч; жмыха подсолнечного – 47,9 кг/ч; кукурузы – 74,4 кг/ч; в целом по рассыпному комбикорму – 317,7 кг/ч. **Обсуждение и заключение.** Оценка основных показателей работы барабанного дозатора показала соответствие требованиям к технологическому процессу дозирования компонентов рассыпного комбикорма. В перспективе возможна установка ячеистого барабана с конструктивными параметрами, зависящими от конкретного рецепта и количества сыпучих компонентов комбикорма для разных видов и возрастных групп животных и птицы. Это позволит повысить эффективность прямоочного непрерывного технологического процесса приготовления рассыпного комбикорма разрабатываемым малогабаритным комбикормовым агрегатом по сравнению с другими конструкциями.

Ключевые слова: малогабаритный комбикормовый агрегат, многокомпонентный барабанный дозатор, рассыпной комбикорм, конструктивно-технологические параметры, производительность дозатора, удельная энергоёмкость

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Вольвак С.Ф., Пастухов А.Г., Бахарев Д.Н., Тимашов Е.П., Кощаев И.А. Определение рациональных параметров барабанного дозатора малогабаритного комбикормового агрегата по результатам экспериментальных исследований. *Инженерные технологии и системы.* 2026;36(2):277–299. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.26362.277-299>

Determination of the Rational Parameters of a Drum Dispenser for a Small-Sized Compound Feed Unit by the Results of Experimental Studies

S. F. Volvak¹✉, A. G. Pastukhov¹, D. N. Bakharev²,
E. P. Timashov¹, I. A. Koschaev¹

¹ Belgorod State Agrarian University named after V. Gorin, Maysky, Russian Federation, <https://ror.org/00nf68x61>

² Lugansk Vladimir Dahl State University, Lugansk, Russian Federation

✉ volvak.s@yandex.ru

Abstract

Introduction. At present, developing the design of a multicomponent drum dispenser of a small-sized unit for preparing high-quality loose compound feed from home-produced grain fodder and industrial additives on farms and private farm households is very relevant and aimed at solving the problem of ensuring economical consumption, compliance with proportions, accuracy of dosing, and preparation of nutritionally balanced full-ration loose compound feed.

Aim of the Study. The study is aimed at the development of a design and experimental determination of rational design and operational parameters for a multi-component drum dispenser of loose compound feed components in a small-sized compound feed unit.

Materials and Methods. There have been used the methods of determining the weight by volume and weighted average particle diameter, evaluating functional indicators, calculating and estimating the productivity errors, conducting a single-factor experimental study, and processing the measurement results to determine the rational design and operational parameters of the drum dispenser of a small-sized compound unit. There has

been used a moisture meter Wile-65, a grain tester ПХ-1МЦ, a scale CAS MWP-3000, a scale MASTER MS-10, a set K505, a stopwatch СОСп-26-2, and a tachometer ТЧ 10-Р. **Results.** There have been determined the rational design and operational parameters of a five-component drum dispenser with the dosing process energy intensity of 0.2 kWh/t, and an average productivity of 111.3 kg/h for wheat, 47.4 kg/h for soybeans, 36.7 kg/h for additives, 47.9 kg/h for sunflower cake, 74.4 kg/h for corn, and 317.7 kg/h in general for loose compound feed.

Discussion and Conclusion. The evaluation of the drum dispenser main performance indicators has showed compliance with the requirements for the operational process of dosing loose compound feed components. In the future, it will be possible to install a mesh drum with design parameters that depend on the specific recipe and the amount of loose feed components for different types and age groups of animals and poultry that will increase the efficiency of the direct-flow continuous operational process of producing loose compound feed with the use of the small-sized feed unit under developing compared to other designs.

Keywords: small-sized compound feed unit, multicomponent drum dispenser, loose compound feed, design and operational parameters, dispenser productivity, specific energy intensity

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

For citation: Volvak S.F., Pastukhov A.G., Bakharev D.N., Timashov E.P., Koshchaev I.A. Determination of the Rational Parameters of a Drum Dispenser for a Small-Sized Compound Feed Unit by the Results of Experimental Studies. *Engineering Technologies and Systems*. 2026;36(2):277–299. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.26362.277-299>

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение населения продуктами животноводства в достаточном количестве и качестве является актуальной проблемой современного аграрного производства [1]. Одной из основных задач в сфере развития аграрной отрасли считается создание новых технологических процессов для изготовления комбикормов и добавок, формулирование исходных требований и подготовка технических заданий на отечественное оборудование нового образца¹. Производство усовершенствованной техники на агропромышленных предприятиях позволит снизить ее стоимость, а также обеспечить граждан рабочими местами [2].

В системе машин для механизации и автоматизации выполнения процессов при производстве продукции животноводства и птицеводства на период до 2030 года предусмотрены технологические комплексы из более «150 наименований и типоразмеров, в том числе: ... 23 – для приготовления комбикормов» [3]. Н. М. Морозов утверждает, что такие комплексы могут быть использованы как на крупных животноводческих предприятиях, так и на личных подсобных хозяйствах [2].

В крестьянско-фермерских хозяйствах возможно приготовление различных видов комбикормов из собственного зернофуража и промышленных добавок для разных видов и возрастных групп животных и птицы [4; 5]. При этом заготовлении кормов необходимо осуществлять при помощи передового опыта и современных

¹ Об утверждении Федеральной научно-технической программы развития сельского хозяйства на 2017–2030 годы. Постановление Правительства РФ от 25.08.2017 № 996. URL: <https://docs.cntd.ru/document/436761964> (дата обращения: 25.08.2025).

технологий. Это имеет значение в условиях конкурентоспособности и экономической эффективности сектора животноводства [6].

Одним из основных процессов в приготовлении сыпучих кормовых смесей является процесс дозирования, от которого зависит смешивание² [7]. Объемные дозаторы, работающие в непрерывном режиме, гарантируют подачу корма равномерным потоком по установленному технологическому циклу при соблюдении условия непрерывной выдачи корма на протяжении заданного временного интервала [8]. В то же время объединение операций по перемещению, дозированию и смешиванию способствует уменьшению энергопотребления [4]. По типу рабочих органов одним из наиболее часто встречающихся исполнений при дозировании сыпучих кормовых смесей являются барабанные дозаторы [8].

В соответствии с представленными тенденциями развития технических средств дозирования рассыпных комбикормов разработка конструкции и определение конструктивно-технологических параметров барабанного дозатора малогабаритного комбикормового агрегата для фермерских и личных хозяйств населения является актуальной.

Целью данного этапа исследований является разработка конструкции и экспериментальное определение рациональных конструктивно-технологических параметров и производительности многокомпонентного барабанного дозатора малогабаритного комбикормового агрегата для приготовления сыпучих компонентов рассыпного комбикорма.

Для этого необходимо: разработать конструкцию многокомпонентного барабанного дозатора; составить методику экспериментальных исследований; провести эксперименты и проанализировать полученные результаты.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Актуальность научных исследований по созданию новой техники для фермерских и личных хозяйств населения подтверждается современными разработками различных конструкций малогабаритной техники для животноводства и птицеводства [9–11]. В современных условиях развития животноводческой отрасли особую значимость приобретает экономное расходование зерна, используемого на кормовые нужды. Наиболее эффективно фуражное зерно применяется в составе комбикормов, которые сбалансированы по содержанию протеина, аминокислот и других биологически активных веществ³.

По мнению В. И. Сыроватки, Н. В. Ждановой и А. Д. Обухова, комбикорма выступают главным элементом в структуре себестоимости продукции как в животноводстве, так и в птицеводстве. В рационе птицеводства их доля достигает 100 %, в свиноводстве – 95 %, а у крупного рогатого скота – от 30 до 40 %. Именно поэтому технические средства и технологические процессы для производства комбикормов

² Федоренко И.Я. Технологические процессы и оборудование для приготовления кормов: учеб. пособие. М.: Форум; 2007. 176 с.; Васильев С.Н., Эленшлегер А.А., Золотарев С.В., Булгаков А.М. Производство и использование комбикормов в коллективных и фермерских хозяйствах: учеб. пособие для вузов. Барнаул: Алтайский государственный аграрный университет; 2003. 150 с.

³ Федоренко И.Я. Механизация производства комбикормов и амидоконцентратных до- бавок: учеб. пособ. Барнаул: Алтайский государственный аграрный университет; 2008. 32 с. URL: <https://www.sinref.ru/razdel/04650raznoc/15/403119.htm> (дата обращения: 30.08.2025).

непосредственно в хозяйствах должны отличаться универсальностью, простотой и удобством в эксплуатации [12].

Ученые из Нижегородского государственного инженерно-экономического университета установили, что «независимо от вида комбикорма в процессе его приготовления необходимо соблюдение пропорций входящих в него компонентов. Для дозирования применяют дозаторы» [13]. Согласно исследованию А. В. Чупшева, «от процесса правильной дозировки зависит бесперебойная работоспособность оборудования, точность дозирования, снижаются потери пылевидных частиц кормов при транспортировке» [7].

А. Н. Глобин указал, что в нынешних условиях для эффективного улучшения процесса дозирования следует воспринимать дозатор не в качестве отдельного элемента оборудования, а как целостную систему, надежная и качественная работа которой напрямую зависит от устойчивого функционирования каждого ее компонента. При разработке подобных систем появляется возможность учесть все факторы, воздействующие на их работу, благодаря чему процесс дозирования в меньшей степени подвергается внешним влияниям, что в итоге должно обеспечить более стабильную работу дозаторов⁴.

В то же время У. К. Сабиев, Р. Н. Амрин и А. Н. Кушнерик отмечают, что «исследования по разработке компактного, надежного в работе, простого в обслуживании многокомпонентного дозатора сыпучих кормов являются актуальными» [14].

При этом В. Н. Николаев считает, что «прямоточный способ, реализованный в малогабаритных комбикормовых агрегатах, является наиболее эффективным и характеризуется малой энерго- и металлоемкостью, простотой в обслуживании и адаптирован к условиям производства комбикормов непосредственно в хозяйствах» [4].

На основании обзора литературы отмечается широкое применение комбикормов в птицеводстве, потребность в соблюдении их правильной дозировки, системность рассмотрения конструкции дозатора в составе единой компоновки комбикормового агрегата и принцип прямоточности построения технологического процесса.

Таким образом, в соответствии с требованием прямоточности процесса приготовления рассыпного комбикорма, разработку конструкции дозатора следует рассматривать в комплексе с учетом последовательности единой компоновки бункера, дозатора и измельчителя-смесителя малогабаритного комбикормового агрегата. В связи с этим проведен патентный анализ существующих конструкций малогабаритных комбикормовых агрегатов (RU 2050151, RU 2155526, RU 2222239 и др.) и выявлен ряд существенных недостатков. К ним относятся: отсутствие дозирующего устройства, неспособность осуществлять точное дозирование, необходимость применения отдельной приводной станции дозатора, что не обеспечивает условия прямоточности и непрерывности процессов дозирования, измельчения и смешивания компонентов рассыпного комбикорма в единой конструкции.

⁴ Глобин А.Н. Дозирующие устройства: моногр. Саратов: Вузовское образование; 2017. 344 с.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования

Проведенный анализ основных способов дозирования, характера протекания процесса и конструкций дозаторов кормов⁵ показал, что в качестве объекта для дальнейших исследований целесообразно выбрать многокомпонентный барабанный дозатор сухих сыпучих кормов в единой конструкции малогабаритного комбикормового агрегата [15–17].

Методы, оборудование и процедура исследования

На основании ранее проведенных исследований⁶ в конструкции малогабаритного комбикормового агрегата реализовали принцип прямоточности построения непрерывного технологического процесса при использовании многосекционного бункера с перегородками многокомпонентного объемного дозатора барабанного типа и вертикального измельчителя-смесителя, снабженного молотковым барабаном, сменным решетом и лопастной швырялкой.

Разрабатываемая конструкция малогабаритного комбикормового агрегата (рис. 1) содержит пятисекционный бункер с перегородками 3, пятикомпонентный барабанный дозатор 2, измельчитель-смеситель 8, циклон-разгрузитель 10 и передвижной контейнер 9.

Для реализации разных рецептов комбикорма при разнице объемной массы сыпучих компонентов пятикомпонентный барабанный дозатор 2 выполнен в виде составного ячеистого барабана 4. Барабан разделен на независимые друг от друга пять отдельных секций и укомплектован пятью сменными звездочками 5 и дисками 6 между ними, которые вращаются на общем горизонтальном валу 7 с приводом от мотор-редуктора 1. Сменные звездочки 5 имеют четыре различные по объему ячейки, размещенные в разных плоскостях и смещенные одна относительно другой. Такая конструкция позволяет снизить энергоемкость и повысить эффективность процесса дозирования рассыпного комбикорма по заданному рецепту [15].

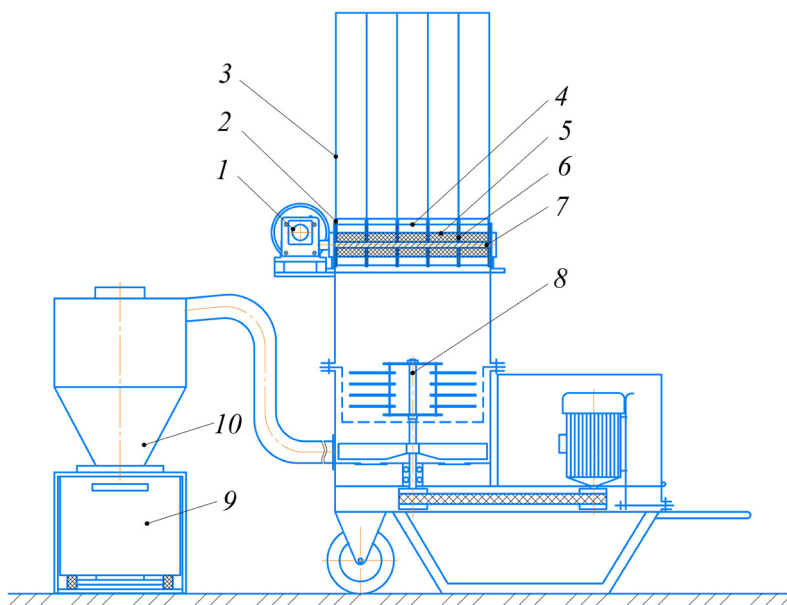
В измельчителе-смесителе 8 к раме с опорными колесами, салазками и ручкой прикреплен составной цилиндрический корпус с приемной, измельчающей и выгрузной камерами [16; 17]. Закреплено сменное решето с пропуском через вертикальный вал. Молотковый барабан с шарнирными молотками и лопастная швырялка надеты на вертикальный вал, работающий от электропривода посредством клиноременной передачи [16; 17].

Для определения рациональных конструктивно-технологических параметров барабанного дозатора малогабаритного комбикормового агрегата использовали методы определения объемной массы, средневзвешенного диаметра частиц, оценки

⁵ Вольвак С.Ф., Пастухов А.Г., Бахарев Д.Н., Добрицкий А.А. Научные основы совершенствования технологических процессов и технических средств приготовления кормов для сельскохозяйственных животных и птицы: моногр. Белгород: ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ; 2022. 193 с.

⁶ Вольвак С.Ф., Шаповалов В.И. Комбикормовый агрегат для фермерских хозяйств. В: Интеграция образования, науки и практики в АПК: проблемы и перспективы: сб. материалов III междунар. науч.-практ. конф. Луганск: ФГБОУ ВО Луганский ГАУ; 2023. С. 252–254; Вольвак С.Ф. Организация комбикормового производства с упрощенной технологической схемой. В: Актуальные проблемы агроинженерии в XXI веке: материалы нац. науч.-практ. конф. Майский: ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ; 2024. С. 73–74; Вольвак С.Ф. Выбор дозирующей системы комбикормового агрегата. В: Актуальные проблемы агроинженерии в XXI веке: материалы нац. науч.-практ. конф. Майский: ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ; 2024. С. 75–76.

функциональных показателей, расчета и оценки погрешности производительности, однофакторного экспериментального исследования, обработки результатов измерений.



Р и с. 1. Схема малогабаритного комбикормового агрегата:

1 – мотор-редуктор; 2 – пятикомпонентный барабанный дозатор; 3 – пятисекционный бункер с перегородками; 4 – ячеистый барабан; 5 – сменная звездочка; 6 – диск; 7 – вал; 8 – измельчитель-смеситель; 9 – передвижной контейнер; 10 – циклон-разгрузитель

F i g. 1. Scheme of a small-sized compound feed unit:

1 – gear motor; 2 – five-component drum dispenser; 3 – five-section bunker with partitions; 4 – mesh drum; 5 – replaceable sprocket; 6 – disc; 7 – shaft; 8 – grinder-mixer; 9 – mobile container; 10 – cyclone unloader

Источник: рисунок 1 взят из статьи [15].

Source: the picture 1 is taken from the article [15].

На основании расчета в программном комплексе «Корм оптима» получили рецепт полнорационного рассыпного комбикорма для кур-несушек кросса «Хайсек коричневый» из пяти сыпучих компонентов: зерна пшеницы, кукурузы и сои, жмыха подсолнечного дробленого, смеси обогатительных добавок (премикса ПП-2, известняковой муки, монокальцийфосфата и др.) [15].

Используя методику однофакторного эксперимента с последующей статистической обработкой массива данных [15], для исходных компонентов рассыпного комбикорма определили кондиционную влажность с помощью влагомера «Wile-65» и объемную массу с помощью пурки ПХ-1МЦ по ГОСТ 28254-2014⁷. При этом использовали электронные лабораторные весы CAS MWP-3 000 [15].

⁷ ГОСТ 28254-2014 Комбикорма, комбикормовое сырье. Методы определения объемной массы и угла естественного откоса. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200112147> (дата обращения: 14.09.2025).

Средние арифметические значения объемной массы компонентов комбикормовой смеси определили экспериментально с трехкратной повторностью при обеспечении доверительной вероятности 0,95 (табл. 1).

Таблица 1

Table 1

Значения объемной массы компонентов рассыпного комбикорма
Volume mass values of loose compound feed components

Наименование / Name	Влажность, % / Humidity, %	Объемная масса, кг/м ³ / Volume mass, kg/m ³
Пшеница (зерно) / Wheat (grain)	8,2	781,5
Соя (зерно) / Soybean (grain)	8,3	740,3
Добавки обогатительные / Enrichment additives	7,9	1 155,7
Жмых подсолнечный / Sunflower cake	6,2	607,4
Кукуруза (зерно) / Corn (grain)	8,1	671,7

Источник: таблицы 1–7 составлены авторами статьи.

Source: the tables 1–7 were compiled by the authors of the article.

Расчетное значение подачи каждого компонента комбикорма было согласовано с рецептом для кур-несушек кросса «Хайсекс коричневый», а общая подача всех составляющих кормовой смеси исследуемым барабанным дозатором согласована с производительностью (пропускной способностью) измельчителя-смесителя.

По рецепту и опытным значениям объемной массы для каждого компонента рассыпного комбикорма рассчитали рациональные значения параметров звездочек ячеистого барабана с учетом принятых значений частоты его вращения $n = 32 \text{ мин}^{-1}$, длины рабочей части $l = 50 \text{ мм}$, числа $z = 4$ шт. и коэффициента заполнения ячеек звездочек $\varphi = 0,85$ (табл. 2).

Таблица 2

Table 2

Значения параметров звездочек ячеистого барабана
Values of the parameters of the mesh drum sprockets

Компоненты рассыпного комбикорма / Components of loose compound feed		Подача q / Supply q			Параметры ячейки звездочки / Sprocket cell parameters	
		Расчетная / Calculated		С учетом, $\varphi = 0,85$ / Taking into account $\varphi = 0.85$	Объем V , / Volume V	Площадь поперечного сечения S / Cross-sectional area S
Состав / Composition	%	кг/ч / kg/h	мм ³ /с / mm ³ /s	мм ³ /с / mm ³ /s	мм ³ / mm ³	мм ² / mm ²
Пшеница / Wheat	35	87,502	31101,2	35766,3	16775,95	335,51910
Соя / Soybean	15	37,501	14070,9	16181,5	7589,82	151,79650
Добавки / Additives	11,445	28,613	6877,1	7908,7	3709,53	74,19059
Жмых / Cake	15	37,501	17149,6	19722,0	9250,49	185,00970
Кукуруза / Corn	23,555	58,889	24352,6	28005,5	13135,78	262,71560

Из полученных значений площади поперечного сечения ячеек звездочек: $S_1 = 335,5191 \text{ мм}^2$, $S_2 = 151,7965 \text{ мм}^2$, $S_3 = 74,19059 \text{ мм}^2$, $S_4 = 185,0097 \text{ мм}^2$, $S_5 = 262,7156 \text{ мм}^2$ определили глубину и ширину ячеек. В соответствии с полученными результатами изготовили опытный образец пятисекционного ячеистого барабана с пятью сменными звездочками, выполненными на 3D-принтере из PETG-пластика.

В связи с тем, что размеры частиц исходного материала оказывали большое влияние на процесс дозирования, конструктивно-технологические параметры рабочих органов и производительность барабанного дозатора, возникла необходимость в определении средневзвешенного диаметра частиц исходного материала в соответствии с зоотехническими требованиями. Такие требования предъявляются к качеству получаемой кормосмеси в результате дозирования, измельчения и смешивания ее компонентов.

Средневзвешенный диаметр частиц исходных компонентов определяли ситовым способом с учетом требований ГОСТ 13496.8-72⁸. Для этого в течение 5 минут просеивали навески исходных компонентов массой по 100 г на лабораторном рассеве У1-ЕРЛ-1-1 с набором штампованных сит, составленными в порядке уменьшения диаметров круглых пробивных отверстий от 5,0 до 0,2 мм. Остатки на ситах и поддоне взвешивали с точностью до 0,01 г на весах ВК-600. За окончательный результат принимали среднеарифметическое результатов двух параллельных определений. Допускаемые расхождения между результатами параллельных определений не превышали 0,1 %.

Средневзвешенный диаметр частиц d , мм, вычисляли по формуле⁹:

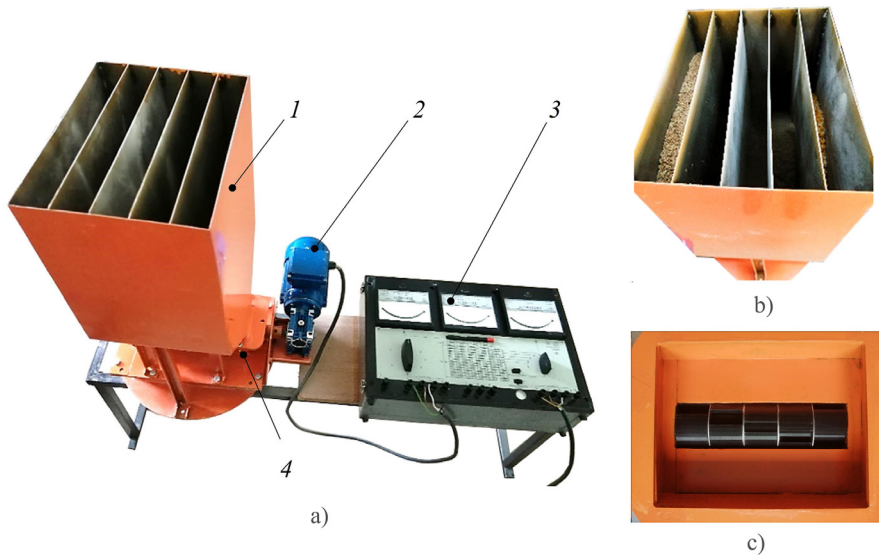
$$d = \sum_{i=1}^n \frac{d_i p_i}{100} = \frac{d_1 p_1 + d_2 p_2 + \dots + d_n p_n}{100},$$

где d_i – средний размер отверстий двух смежных сит, мм; p_i – весовой выход (масса) частиц класса, % ($\sum p_i = 100$ %).

Для проведения лабораторных однофакторных экспериментов разработали и изготовили экспериментальную установку (рис. 2), в состав которой вошли: пятисекционный бункер 1; пятикомпонентный барабанный дозатор 4 с электроприводом от компактного червячного мотор-редуктора 2 серии NMRV030-30-30-0, 12кВт-63В14. Для измерения мощности в трехфазной цепи переменного тока использовали встроенный ваттметр комплекта измерительного 3 серии К505, для взвешивания массы навесок компонентов рассыпного комбикорма – весы MASTer MS-10, для регистрации времени опытов – секундомер механический СОСпр-26-2, частоту вращения ячеистого барабана измеряли при помощи тахометра часового ТЧ 10-Р.

⁸ ГОСТ 13496.8-72 Комбикорма. Методы определения крупности размола и содержания неразмолотых семян культурных и дикорастущих растений. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200024327> (дата обращения: 14.09.2025).

⁹ Механизация измельчения зерновых кормов [Электронный ресурс]. URL: <https://studfile.net/preview/3364151/page/9/> (дата обращения: 14.09.2025); Чистяков И.Д. Физико-механические свойства сырья и готовой продукции мукомольно-крупяного, масличного и комбикормового производства: сайт [Электронный ресурс]. URL: https://de.donstu.ru/CDOCourses/Design/Mashini&ApparatiPishivi hProizvodstv/Чистяков_часть2/All.files/1_1.htm (дата обращения: 14.09.2025).



Р и с. 2. Экспериментальная установка пятикомпонентного барабанного дозатора:
а) общий вид экспериментальной установки:

- 1 – пятисекционный бункер с перегородками; 2 – мотор-редуктор;
3 – комплект измерительный К505; 4 – пятикомпонентный барабанный дозатор;
б) пятисекционный бункер с дозируемыми компонентами комбикорма;
в) пятисекционный ячеистый барабан (вид снизу)

F i g. 2. Experimental installation of a five-component drum dispenser:

- а) general view of the experimental installation:
1 – five-section bunker with partitions; 2 – gear motor; 3 – measuring kit K505;
4 – five-component drum dispenser;
б) five-section bunker with dosed compound feed components;
в) five-section cellular drum (bottom view)

Источник: фотографии для рисунка 2 сделаны С. Ф. Вольваком при проведении лабораторных экспериментов в 2025 г.

Source: the photographs were taken by S. F. Volvak during laboratory experiments in 2025.

Оценку качества работы исследуемого барабанного дозатора кормов проводили на каждом из компонентов рассыпного комбикорма при номинальном режиме согласно СТО АИСТ 19.2-2008¹⁰. Дозатор включали в работу на 0,4 ч с целью обеспечения выполнения устойчивого технологического процесса и надежности соединений.

Расчетное значение производительности (подачи) каждого компонента кормовой смеси в отдельных пяти секциях ячеистого барабана q_d , кг/ч определяли по формуле [15]:

$$q_d = 60Slzn\gamma\varphi,$$

где S – площадь поперечного сечения одной ячейки звездочки в секции ячеистого барабана, м²; l – длина рабочей части ячеек звездочки в секции ячеистого барабана, $l = 50 \cdot 10^{-3}$ м; z – число ячеек звездочки в секции ячеистого барабана,

¹⁰ СТО АИСТ 19.2-2008. Испытания сельскохозяйственной техники. Машины и оборудование для приготовления кормов. Методы оценки функциональных показателей. М.: ФГНУ «РосНИИТиМ»; 2008.

$z = 4$ шт.; n – частота вращения ячеистого барабана, $n = 32 \text{ мин}^{-1}$; γ – объемная масса продукта (материала), кг/м^3 ; φ – коэффициент заполнения ячеек звездочек, $\varphi = 0,85$ [15].

Опыты проводили в пятикратной повторности на навесках, отобранных в соответствии с заданным рецептом (5 кг для пшеницы, 3 кг для сои, 2 кг для добавок, 3 кг для жмыха подсолнечного и 4 кг для кукурузы). После чего, для определения точности (погрешности) дозирования компонентов комбикорма, находили разницу между фактической и расчетной производительностью барабанного дозатора кормов. Полученные значения обрабатывали методами математической статистики.

В кормоприготовлении допускается относительная погрешность объемных дозаторов 10–12 %. На погрешность влияет нестабильность таких свойств кормовых материалов, как объемная масса, коэффициенты трения, угол естественного откоса, угол обрушения. Эти свойства, в свою очередь, зависят от влажности корма, его гранулометрического состава и др.¹¹.

При использовании объемных дозаторов погрешность внесения компонентов, составляющих в рецепте более 30 %, допускается до +1,5 %; 10–30 % – до $\pm 1,0$ %; 3–10 % – до $\pm 0,5$ %; менее 3 % – до $\pm 0,1$ % суммарного количества всех компонентов¹². При этом соответствие исследуемого барабанного дозатора непрерывного действия заданным условиям работы оценивали исходными (зотехническими) требованиями к точности дозирования, которые рассматривали как технологический допуск на процесс дозирования в зависимости от доли компонента рассыпного комбикорма (для пшеницы $\Delta \leq \pm 1,5$ %; для остальных компонентов $\Delta \leq \pm 1,0$ %)¹³.

Определили значение и оценили погрешность производительности дозатора с учетом ОСТ 70.19.2-83¹⁴, СТО АИСТ 19.2-2008, ГОСТ Р 8.736-2011¹⁵ и других источников¹⁶ [18; 19] по формулам:

$$q = 3\,600 \frac{m}{t},$$

где q – производительность дозатора, кг/ч ; m – масса навески за опыт, кг ; t – время опыта, с ;

¹¹ Коба В.Г., Брагинец Н.В., Мурусидзе Д.Н., Некрашевич В.Ф. Механизация и технология производства продукции животноводства. М.: Колос; 1999. 528 с.

¹² Технология обработки пищевых отходов, кормов животного происхождения и приготовления кормовых смесей [Электронный ресурс]. URL: <https://gcagro.ru/klientam/poleznye-stati/tehnologiya-obrabotki-pishhevyh-othodov-kormov-zhivotnogo-proishozhdeniya-i-prigotovleniya-kormovykh-smesey.html> (дата обращения: 20.09.2025).

¹³ Кулаковский И.В., Кирпичников Ф.С., Резник Е.И. Машины и оборудование для приготовления кормов. М.: Росагропромиздат; 1988. 286 с.

¹⁴ ОСТ 70.19.2-83. Испытания сельскохозяйственной техники. Машины и оборудования для приготовления кормов. М.: Издательство стандартов; 1984.

¹⁵ ГОСТ Р 8.736-2011. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200089016> (дата обращения: 16.09.2025).

¹⁶ Глобин А.Н. Дозирующие устройства; Коба В.Г., Брагинец Н.В., Мурусидзе Д.Н., Некрашевич В.Ф. Механизация и технология производства продукции животноводства; Кулаковский И.В., Кирпичников Ф.С., Резник Е.И. Машины и оборудование для приготовления кормов; Алешкин В.Р., Рошин П.М. Механизация животноводства. М.: Агропромиздат; 1985. 336 с.; Завражнов А.И., Николаев Д.И. Механизация приготовления и хранения кормов. М.: Агропромиздат; 1990. 336 с.; Федоренко И.Я. Технологические процессы и оборудование для приготовления кормов.

$$\bar{q} = \frac{\sum_{i=1}^n q_i}{n},$$

где \bar{q} – средняя производительность дозатора кг/ч; q_i – производительность дозатора в i -ой повторности, кг/ч; n – количество повторностей, $n = 5$;

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^2}{n-1}},$$

где σ – среднеквадратическое отклонение (погрешность) производительности дозатора за фиксированное время, кг/ч;

$$\Delta = \frac{q_{\max} - q_{\min}}{\bar{q}} \cdot 100 \%,$$

где Δ – точность дозирования как технологический допуск производительности дозатора, %; q_{\max} , q_{\min} – производительность дозатора, соответственно, максимальная и минимальная, кг/ч;

$$v = \frac{\sigma}{\bar{q}} \cdot 100 \%,$$

где v – относительная погрешность производительности дозатора как коэффициент вариации, %.

С помощью коэффициента вариации подачи оценивали неравномерность дозирования и относительную меру разброса подачи дозатора относительно среднего значения. Лучший дозатор тот, у которого коэффициент вариации v меньше. Для дозирования дерти, комбикормов и их компонентов необходимо, чтобы $v \leq 5 \%$ ¹⁷.

Значение удельной энергоёмкости процесса дозирования E_d , кВт·ч/т, выполняемого исследуемым барабанным дозатором, определяли по экспериментально полученным значениям производительности q , кг/ч, и потребляемой на процесс дозирования мощности N_d , Вт, без учета мощности, необходимой на холостой ход, по формуле:

$$E_d = \frac{N_d}{q}.$$

Таким образом, в качестве основных показателей работы барабанного дозатора рассыпного комбикорма непрерывного действия, характеризующих его пригодность к выполнению технологического процесса, приняли: производительность q каждого компонента (с возможностью ее регулирования в пределах установленной пропорции); точность дозирования Δ (технологический допуск); неравномерность дозирования (среднеквадратическое отклонение σ и коэффициент v вариации производительности); удельная энергоёмкость процесса дозирования E_d .

¹⁷ Федоренко И.Я. Технологические процессы и оборудование для приготовления кормов.

Допустимые отклонения по массе каждого дозируемого компонента комбикорма определяли умножением расчетной массы в единицу времени на установленные нормированные коэффициенты (в зависимости от процентного содержания компонентов в рецепте). Для исследуемого барабанного дозатора кормов при содержании каждого компонента в рецепте рассыпного комбикорма более 10 % значение нормированного коэффициента составило 0,1 (10 %) для каждого компонента¹⁸.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Полученные результаты ситового анализа навесок компонентов рассыпного комбикорма представлены в таблице 3.

Т а б л и ц а 3

T a b l e 3

Результаты ситового анализа навесок компонентов рассыпного комбикорма
Results of sieve analysis of attachment of loose compound feed components

Компоненты рассыпного комбикорма / Components of loose com- pound feed	Повтор- ность / Repetition	Размеры отверстий сит, мм / The size of the sieve holes, mm							Средневзвешен- ный диаметр частиц, мм / Weighted average particle diameter, mm
		0	0,2	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	
		Средний размер частиц, мм / Average particle size, mm							
		0,1	0,6	1,5	2,5	3,5	4,5	5,5	
Остатки на ситах, г / Residues on sieves, g									
Пшеница / Wheat	1	0	0	0,12	3,93	83,93	12,02	0	3,6
	2	0	0	0,12	3,93	83,89	12,06	0	
Соя / Soybean	1	–							6,6
	2	–							
Добавки / Additives	1	61,01	29,51	7,90	1,48	0,10	0	0	0,4
	2	60,95	29,55	7,92	1,48	0,10	0	0	
Жмых / Cake	1	7,21	32,57	17,68	12,99	10,81	9,77	8,97	2,1
	2	7,22	32,64	17,75	12,93	10,77	9,74	8,95	
Кукуруза / Corn	1	–							7,1
	2	–							

Источник: средневзвешенный диаметр частиц сои и кукурузы взят из¹⁹.

Source: weighted average of the diameter of soybean and corn particles is taken from the¹⁹.

Результаты экспериментального определения производительности барабанного дозатора по каждому компоненту рассыпного комбикорма представлены в таблице 4. Расчет массы навески в целом производили на опытных данных по суммарной производительности, приведенных к минимальному времени опытов.

¹⁸ Кулаковский И.В., Кирпичников Ф.С., Резник Е.И. Машины и оборудование для приготовления кормов.

¹⁹ Бородин И.А. Совершенствование процесса посева семян сои высевающим аппаратом плунжерного типа: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Благовещенск: Дальневост. гос. аграр. ун-т; 2012. 19 с.; Насыпная плотность пшеницы [Электронный ресурс]. URL: <https://strtorg.ru/nasiypnaya-plotnost-pshenitsiy.html#image27> (дата обращения: 14.09.2025).

Таблица 4

Table 4

Результаты определения производительности барабанного дозатора кормов
Results of determining the productivity of the drum feed dispenser

Наименование показателя / Naming of the indicator	Повторность / Repetition					Сумма / The amount	Среднее арифметическое значение / The arithmetic mean
	1	2	3	4	5		
Пшеница / Wheat							
Масса навески, кг / Weight of the attachment, kg	5	5	5	5	5	25	5
Время опыта, с / Experiment time, s	162	161	162	163	161	809	161,8
Производительность, кг/ч / Productivity, kg/h	111,111	111,801	111,111	110,429	111,801	556,253	111,251
Соя / Soybean							
Масса навески, кг / Weight of the attachment, kg	3	3	3	3	3	15	3
Время опыта, с / Experiment time, s	228	227	229	228	227	1139	227,8
Производительность, кг/ч / Productivity, kg/h	47,368	47,577	47,162	47,368	47,577	237,052	47,410
Добавки обогатительные / Enriching additives							
Масса навески, кг / Weight of the attachment, kg	2	2	2	2	2	10	2
Время опыта, с / Experiment time, s	196	196	197	196	196	981	196,2
Производительность, кг/ч / Productivity, kg/h	36,735	36,735	36,548	36,735	36,735	183,488	36,698
Жмых подсолнечный / Sunflower cake							
Масса навески, кг / Weight of the attachment, kg	3	3	3	3	3	15	3
Время опыта, с / Experiment time, s	225	225	225	226	226	1127	225,4
Производительность, кг/ч / Productivity, kg/h	48,000	48,000	48,000	47,788	47,788	239,576	47,915
Кукуруза / Corn							
Масса навески, кг / Weight of the attachment, kg	4	4	4	4	4	20	4
Время опыта, с / Experiment time, s	194	193	193	194	194	968	193,6
Производительность, кг/ч / Productivity, kg/h	74,227	74,611	74,611	74,227	74,227	371,903	74,381
Рассыпной комбикорм / Loose compound feed							
Масса навески, кг / Weight of the attachment, kg	14,285	14,255	14,284	14,333	14,228	71,385	14,277
Время опыта, с / Experiment time, s	162	161	162	163	161	809	161,8
Производительность, кг/ч / Productivity, kg/h	317,441	318,724	317,432	316,547	318,128	1588,272	317,655

Расчет оценки погрешности производительности показал, что по среднеквадратическому отклонению, технологическому допуску и коэффициенту вариации исследуемый барабанный дозатор кормов соответствует требованиям к процессу дозирования сыпучих компонентов рассыпного комбикорма (табл. 5).

Т а б л и ц а 5

T a b l e 5

Расчет оценки погрешности производительности барабанного дозатора кормов
Calculation of the error of a drum feed dispenser productivity

Компоненты / Components	Пшеница / Wheat	Соя / Soybean	Добавки / Additives	Жмых / Cake	Кукуруза / Corn	Всего / Total
Средняя производительность \bar{q} , кг/ч / Average productivity \bar{q} , kg/h	111,251	47,410	36,698	47,915	74,381	317,655
Среднеквадратическое отклонение σ , кг/ч / Standard deviation σ , kg/h	0,574	0,174	0,084	0,116	0,210	0,820
Технологический допуск Δ , % / Technological allowance Δ , %	1,233	0,875	0,510	0,442	0,516	0,685
Коэффициент вариации v , % / Coefficient of variation v , %	0,516	0,367	0,229	0,242	0,282	0,258

Расчет нормы отклонения дозируемых компонентов комбикормовой смеси показал, что допустимые отклонения от общей массы порции находятся в пределах установленных нормированных коэффициентов²⁰ (табл. 6).

Т а б л и ц а 6

T a b l e 6

Расчет нормы отклонения дозируемых компонентов рассыпного комбикорма
Calculation of the deviation norm for the dosed components of loose compound feed

Компоненты / Components	Норма ввода компонентов по рецепту, % / The norm of input of components by recipe, %	Требуемая производительность дозатора, кг/ч / Required productivity dispenser, kg/h		Допустимые отклонения			
				в дозировании, кг/ч / in the dosage, kg/h		от общей массы порции, % / of the total mass of the portion, %	
				расчетная / calculated	фактическая / actual	расчетные / calculated	фактические / actual
Пшеница / Wheat	35	87,502	111,251	±8,7502	±11,1251	±3,50	±3,50
Соя / Soybean	15	37,501	47,410	±3,7501	±4,7410	±1,50	±1,49
Добавки / Additives	11,445	28,613	36,698	±2,8613	±3,6698	±1,14	±1,16
Жмых / Cake	15	37,501	47,915	±3,7501	±4,7915	±1,50	±1,51
Кукуруза / Corn	23,555	58,889	74,381	±5,8889	±7,4381	±2,36	±2,34
Всего / Total	100	250,006	317,655	±25,0006	±31,7655	±10	±10

²⁰ Кулаковский И.В., Кирпичников Ф.С., Резник Е.И. Машины и оборудование для приготовления кормов.

Сопоставление полученных экспериментальных данных по отдельным компонентам и в целом по рассыпному комбикорму (табл. 7) показало, что увеличение значений фактической производительности q_a по отношению к значениям расчетной производительности q_d можно выразить в виде поправочного коэффициента производительности дозатора k . На его величину влияют конструктивные зазоры между ячеистым барабаном и корпусом барабанного дозатора, а также средне-взвешенный диаметр исходных частиц компонентов рассыпного комбикорма, что необходимо учитывать в дальнейших исследованиях.

Таблица 7

Table 7

Сопоставление расчетной и фактической производительности и расчет коэффициента производительности барабанного дозатора кормов

Comparison of calculated and actual productivity and calculation of the productivity coefficient of the drum feed dispenser

Показатель / Indicator	Компоненты рассыпного комбикорма / Components of loose compound feed											
	Пшеница / Wheat		Соя / Soybean		Добавки / Additives		Жмых / Cake		Кукуруза / Corn		Всего / Total	
	кг/ч / kg/h	%	кг/ч / kg/h	%	кг/ч / kg/h	%	кг/ч / kg/h	%	кг/ч / kg/h	%	кг/ч / kg/h	%
q_d	87,502	35	37,501	15	28,613	11,445	37,501	15	58,889	23,555	250,006	100
q_a	111,251	35,023	47,410	14,925	36,698	11,553	47,915	15,084	74,381	23,415	317,655	100
\pm	+23,749	+0,023	+9,909	-0,075	+8,085	+0,108	+10,414	+0,084	+15,492	-0,140	+67,649	0
k	1,27141		1,26423		1,28256		1,27770		1,26307		1,27059	

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что при дозировании сыпучих кормов следует исходить из соответствия рецепту рассыпного комбикорма и производительности барабанного дозатора. При этом целесообразно учитывать значения средневзвешенного диаметра частиц исходных компонентов для установления рациональных конструктивно-технологических параметров и достижения высокой точности изготовления конструкции барабанного дозатора.

Установлены средневзвешенные диаметры частиц исходных компонентов рассыпного комбикорма, которые оказывают большое влияние на процесс объемного непрерывного дозирования, конструктивно-технологические параметры рабочих органов и производительность многокомпонентного барабанного дозатора.

Изготовлена экспериментальная установка пятикомпонентного барабанного дозатора с электроприводом от червячного мотор-редуктора и пятисекционным бункером с перегородками. Конструкция опытного образца пятисекционного ячеистого барабана имеет выполненные на 3D-принтере из PETG-пластика пять сменных звездочек с четырьмя ячейками, различными по геометрической форме и объему, размещенными не в одной плоскости и смещенными одна относительно другой.

ОБСУЖДЕНИЕ

Концепция повышения эффективности технологического процесса приготовления рассыпных комбикормов путем объединения систем дозирования, измельчения и смешивания сухих сыпучих кормов в единую конструкцию малогабаритного

комбикормового агрегата позволила обеспечить прямоочность построения и непрерывность процесса, а также получение более однородного состава готового продукта в установленной пропорции.

Энергетическая оценка по установленной мощности электродвигателя предварительно показала, что удельный расход энергии (кВт·ч на единицу производительности) экспериментальной конструкции, равный 0,38 кВт·ч/т, примерно сопоставим с существующими конструкциями барабанных дозаторов – 0,33 кВт·ч/т²¹. При этом мощность, потребляемая на процесс дозирования рассыпного комбикорма, в среднем составила 63,6 Вт.

Прослеживается взаимосвязь величин средневзвешенного диаметра частиц исходного материала (табл. 3) и коэффициента производительности дозатора (табл. 7): с увеличением средневзвешенного диаметра частиц величина коэффициента производительности дозатора снижается, зависимость близка к линейной.

Разница между полученным и заданным процентным содержанием (относительными долями) отдельных компонентов в рецепте находится в пределах допустимой погрешности (для пшеницы – $\pm 1,500\%$, для остальных компонентов – $\pm 1,000\%$).

Превышение полученных значений фактической производительности по всем компонентам рассыпного комбикорма по сравнению со значениями расчетной производительности (табл. 7) можно объяснить наличием неучтенных в расчетах конструктивных зазоров между ячеистым барабаном и корпусом дозатора. Поэтому в качестве расчетных целесообразно принять среднее значение фактической производительности, которая показывает, какое количество корма может подавать ячеистый барабан при условии заполнения его ячеек с учетом зазоров. При этом, принимая во внимание технологические аспекты, необходимо стремиться к уменьшению этих зазоров, что, однако, может привести к трению или заклиниванию между узлами из-за конструктивных особенностей.

Таким образом, предлагается уточненная формула для определения расчетного значения производительности каждого компонента в отдельных секциях ячеистого барабана многокомпонентного барабанного дозатора q_a , кг/ч, с учетом эмпирического коэффициента производительности k , определяемого экспериментально:

$$q_a = q_d k.$$

В связи с этим для дальнейших исследований в качестве расчетного значения производительности многокомпонентного барабанного дозатора целесообразно принять полученные экспериментально средние значения производительности по каждому компоненту: для пшеницы – 111,3 кг/ч; для сои – 47,4 кг/ч; для добавок – 36,7 кг/ч; для жмыха – 47,9 кг/ч; для кукурузы – 74,4 кг/ч и в целом по рассыпному комбикорму – 317,7 кг/ч. Удельная энергоемкость процесса дозирования в среднем составила 0,2 кВт·ч/т.

Полученные экспериментальные данные по средней производительности, среднеквадратическому отклонению, технологическому допуску, коэффициенту вариации, нормам допустимых отклонений, погрешности внесения компонентов

²¹ Садов В.В. Обоснование структуры и состава технологических линий для производства комбикормов в сельскохозяйственных предприятиях: дисс ... д-ра техн. наук. Барнаул, 2018. 294 с.

по рецепту и удельной энергоемкости процесса дозирования свидетельствуют о высокой эффективности работы барабанного дозатора при соответствии предъявляемым требованиям к процессу дозирования сыпучих компонентов рассыпного комбикорма.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для обеспечения необходимой подачи исходных компонентов рассыпного комбикорма и согласованной работы барабанного дозатора с измельчителем-смесителем в соответствии с рецептом для кур-несушек кросса «Хайсекс коричневый» получены рациональные конструктивно-технологические параметры ячеистого барабана многокомпонентного барабанного дозатора: частота вращения $n = 32 \text{ мин}^{-1}$; длина рабочей части ячеек звездочек $l = 50 \text{ мм}$; число ячеек звездочек $z = 4 \text{ шт.}$; объем ячеек звездочек $V_1 = 16\,776 \text{ мм}^3$; $V_2 = 7\,590 \text{ мм}^3$; $V_3 = 3\,710 \text{ мм}^3$; $V_4 = 9\,250 \text{ мм}^3$; $V_5 = 13\,136 \text{ мм}^3$.

Разработанная конструкция многокомпонентного барабанного дозатора с определенными параметрами за счет более стабильного и равномерного дозирования сыпучих компонентов рассыпного комбикорма позволит добиться упрощения технологической схемы, получения однородного состава и уменьшения себестоимости готового продукта. При ее применении возможно снижение энергозатрат, повышение надежности и эффективности работы агрегата.

В перспективе, в зависимости от заданного рецепта и количества сыпучих компонентов рассыпного комбикорма для разных видов и возрастных групп животных и птицы, возможна установка ячеистого барабана многокомпонентного барабанного дозатора с другими конструктивными параметрами. Это позволит в целом повысить эффективность прямоточного непрерывного технологического процесса приготовления рассыпного комбикорма разрабатываемым малогабаритным комбикормовым агрегатом по сравнению с другими конструкциями. При этом разработанный многокомпонентный барабанный дозатор может быть использован не только при компоновке предлагаемого малогабаритного комбикормового агрегата, но и при разработке конструкций комбикормовых агрегатов различных типоразмеров и производительности.

Таким образом, создание более эффективного, надежного и гибкого многокомпонентного барабанного дозатора малогабаритного комбикормового агрегата отвечает современным требованиям сельского хозяйства и способствует оптимизации технологического процесса приготовления рассыпного комбикорма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вольвак С.Ф., Шаповалов В.И. Исследование процесса измельчения концентрированных кормов. *Инновации в АПК: проблемы и перспективы*. 2022;(4):14–24. URL: <https://belgau.ru/InfResource/magazine.php> (дата обращения: 25.08.2025).
2. Морозов Н.М. Направления развития системы машин для животноводства. *Техника и технологии в животноводстве*. 2019;(4):7–11. URL: https://livestockjournal.ru/4_36_2019 (дата обращения: 25.08.2025).

3. Морозов Н.М. Направления технического прогресса в механизации и автоматизации животноводства и эффективность их применения. *Техника и оборудование для села*. 2022;(12):2–5. URL: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2022-12-2-5>
4. Николаев В.Н. Анализ технологических схем приготовления рассыпных комбикормов в сельскохозяйственных предприятиях. *Научный аспект*. 2024;3(6):299–305. URL: <https://na-journal.ru/arkhiv/14104-zhurnal-nauchnyj-aspekt-6-2024-tom3> (дата обращения: 26.08.2025).
5. Сергеев Н.С., Николаев В.Н., Литаш А.В., Зязев Е.В., Гайнуллин Э.Н. Технология и технические средства для приготовления сыпучих кормовых смесей на базе многокомпонентного вибрационного дозатора. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2015;(1):68–72. URL: <https://orensau.ru/ru/nauka/izvestiya-orenburgskogo-gau> (дата обращения: 26.08.2025).
6. Astanakulov K., Borotov A., Tursunov Ja., Tursunov S., Ariffin A.S. Dependence of the Uniformity of Feed Mixing in the Feed Mixing Device of the Granulation Line on the Number of Paddle Shaft Revolutions and Mixing Time. *AEGISD-IV: BIO Web of Conferences*. 2024;105(1):02011. URL: <https://doi.org/10.1051/bioconf/202410502011>
7. Чупшев А.В. Обоснование перспективной операционной схемы приготовления комбикормов-концентратов в условиях животноводческих предприятий. *Нива Поволжья*. 2021;(3):135–141. URL: <https://doi.org/10.36461/NP.2021.60.3.022>
8. Ведищев С.М., Глазков А.Ю., Прохоров А.В. Анализ дозаторов кормов. *Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского*. 2014;(1):103–108. URL: <https://vernadsky.tstu.ru/ru/vjpusk/2014/vjpusk-01.php> (дата обращения: 26.08.2025).
9. Choriev R.K., Khudaynazarov D.Kh., Israilova D.A. Dependence of the Amount of Feed Distribution in the Small Sized Feed Distribution Device on the Number of Rotations of Blade Rotor. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: II International Conference on Agricultural Engineering and Green Infrastructure Solutions. Tashkent: IOP Publishing Ltd; 2022:012074. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1076/1/012074>
10. Borotov A., Bekzhanov S., Nurjan D., Tursunov J., Tursunov Sh., Boykulov U. и др. Development of the Construction of the Feed Mixer Device of Granulation Line. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: II International Conference on Environmental Technologies and Engineering for Sustainable Development. Tashkent: IOP Publishing Ltd; 2023:012013. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1284/1/012013>
11. Iskakov R.M., Mamirbaeva I.K., Gulyarenko A.A., Silaev M.Yu., Gusev A.S. Improved Hammers for Crushers in Feed Production. *Russian Engineering Research*. 2022;(42):987–992. URL: <https://doi.org/10.3103/S1068798X22100124>
12. Сыроватка В.И., Жданова Н.В., Обухов А.Д. Система машин для приготовления комбикормов в хозяйствах. *Техника и технологии в животноводстве*. 2020;(1):24–31. URL: https://livestockjournal.ru/1_37_2020 (дата обращения: 30.08.2025).
13. Булатов С.Ю., Нечаев В.Н., Сергеев А.Г. Система дозирования компонентов комбикорма. *Кормление сельскохозяйственных животных и кормопроизводство*. 2021;(2):62–70. URL: <https://doi.org/10.33920/sel-05-2102-06>
14. Сабиев У.К., Амрин Р.Н., Кушнерик А.Н. Краткий анализ многокомпонентных дозаторов сыпучих кормов. *Вестник Омского государственного аграрного университета*. 2016;(2):238–241. URL: https://www.omgau.ru/vestnik/arkhiv/vestnik-omskogo-gau-2-22-2016.php?PAGEN_8=3 (дата обращения: 08.09.2025).
15. Вольвак С.Ф., Пастухов А.Г., Бахарев Д.Н., Кошцаев И.А. Обоснование конструкции барабанного дозатора малогабаритного комбикормового агрегата. *Инновации в АПК: проблемы и перспективы*. 2025;(1):14–24. URL: <https://belgau.ru/InfResource/magazine.php> (дата обращения: 10.09.2025).
16. Вольвак С.Ф., Шаповалов В.И., Бахарев Д.Н., Добрицкий А.А. Комбикормовый агрегат. Патент 2805301 С1 Российская Федерация. 13 октября 2023. URL: <https://elibrary.ru/rfddi> (дата обращения: 10.09.2025).

17. Вольвак С.Ф., Шаповалов В.И., Пастухов А.Г., Бахарев Д.Н. Малогабаритный комбикормовый агрегат. Патент 2853007 С1 Российская Федерация. 17 декабря 2025. URL: <https://elibrary.ru/hwlpdg> (дата обращения: 10.09.2025).
18. Bulatov S., Nechaev V., Savinyh P., Rucins A. Research Results of Experimental Automated System for Dosing Bulk Materials. In: Engineering for Rural Development: Conference: 20th International Scientific Conference. Jelgava; 2021. p. 199–204. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2021.20.TF043>
19. Bulatov S.Yu., Nechaev V.N., Zykin A.A., Sergeev A.G. Investigation of Kinematic Characteristics of Screw Dispensers for Sustainable Agrarian-and-Feed Production. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing Ltd; 2022:042028. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/981/4/042028>

REFERENCES

1. Volvak S.F., Shapovalov V.I. Study of the Grinding Process Concentrated Feed. *Innovations in Agricultural Complex: Problems and Perspectives*. 2022;(4):14–24. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://belgau.ru/InfResource/magazine.php> (accessed 25.08.2025).
2. Morozov N.M. Directions of the Livestock Machine System Development. *Machinery and Technologies in Livestock*. 2019;(4):7–11. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: https://livestockjournal.ru/4_36_2019 (accessed 25.08.2025).
3. Morozov N.M. Directions of Technical Progress in the Mechanization and Automation of Animal Husbandry and the Effectiveness of their Application. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2022;(12):2–5. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2022-12-2-5>
4. Nikolaev V.N. [Analysis of Technological Schemes for the Preparation of Loose Compound Feeds in Agricultural Enterprises]. *The Scientific Aspect*. 2024;3(6):299–305. (In Russ.) Available at: <https://na-journal.ru/arhiv/14104-zhurnal-nauchnyj-aspekt-6-2024-tom3> (accessed 26.08.2025).
5. Sergeev N.S., Nikolaev V.N., Litash A.V., Zyazev Ye.V., Gainullin E.N. Technology and Technical Means for Dry Feed Mixtures Preparation Based on the Multi-Component Vibration Dispenser. *Izvestiya Orenburg State Agrarian University*. 2015;(1):68–72. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://orensau.ru/ru/nauka/izvestiya-orenburgskogo-gau> (accessed 26.08.2025).
6. Astanakulov K., Borotov A., Tursunov Ja., Tursunov S., Ariffin A.S. Dependence of the Uniformity of Feed Mixing in the Feed Mixing Device of the Granulation Line on the Number of Paddle Shaft Revolutions and Mixing Time. *AEGISD-IV: BIO Web of Conferences*. 2024;105(1):02011. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202410502011>
7. Chupshv A.V. Justification of the Prospective Operational Scheme Preparation of Mixed Fodder Concentrates in the Conditions of Livestock Enterprises. *Niva Povolzhya*. 2021;(3):135–141. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.36461/NP.2021.60.3.022>
8. Vedishchev S.M., Glazkov A.Yu., Prokhorov A.V. The Analysis of Forage Batchers. *Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University*. 2014;(1):103–108. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://vernadsky.tstu.ru/ru/vjpusk/2014/vjpusk-01.php> (accessed 26.08.2025).
9. Choriev R.K., Khudaynazarov D.Kh., Israilova D.A. Dependence of the Amount of Feed Distribution in the Small Sized Feed Distribution Device on the Number of Rotations of Blade Rotor. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: II International Conference on Agricultural Engineering and Green Infrastructure Solutions. Tashkent: IOP Publishing Ltd; 2022:012074. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1076/1/012074>
10. Borotov A., Bekzhanov S., Nurjan D., Tursunov J., Tursunov Sh., Boykulov U., et al. Development of the Construction of the Feed Mixer Device of Granulation Line. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: II International Conference on Environmental Technologies and Engineering for Sustainable Development. Tashkent: IOP Publishing Ltd; 2023:012013. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1284/1/012013>

11. Iskakov R.M., Mamirbaeva I.K., Gulyarenko A.A., Silaev M.Yu., Gusev A.S. Improved Hammers for Crushers in Feed Production. *Russian Engineering Research*. 2022;(42):987–992. <https://doi.org/10.3103/S1068798X22100124>
12. Syrovatka V.I., Zhdanova N.V., Obuhov A.D. System of Machinery for Combined Feeds' Preparing on Farms. *Machinery and Technologies in Livestock*. 2020;(1):24–31. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: https://livestockjournal.ru/1_37_2020 (accessed: 30.08.2025).
13. Bulatov S.Yu., Nechaev V.N., Sergeev A.G. The System of Components Dosing in Compound Feed. *Feeding of Agricultural Animals and Feed Production*. 2021;(2):62–70. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.33920/sel-05-2102-06>
14. Sabiev U.K., Amrin R.N., Kushnerik A.N. A Brief Analysis of Multi-Component Free-Running Feed Dispensers. *Vestnik of Omsk State Agrarian University*. 2016;(2):238–241. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: https://www.omgau.ru/vestnik/arkhiv/vestnik-omskogo-gau-2-22-2016.php?PAGEN_8=3 (accessed 08.09.2025).
15. Volvak S.F., Pastukhov A.G., Bakharev D.N., Koshchaev I.A. Substantiation of the Design of the Drum Dispenser of a Small-Sized Feed Unit. *Innovations in Agricultural Complex: Problems and Perspectives*. 2025;(1):14–24 (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://belgau.ru/InfResource/magazine.php> (accessed 10.09.2025).
16. Volvak S.F., Shapovalov V.I., Bakharev D.N., Dobritskij A.A. Feed Meel. Patent 2805301 C1 Russian Federation. 2023 October 13. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/rffddi>
17. Volvak S.F., Shapovalov V.I., Pastukhov A.G., Bakharev D.N. Compact Combined Feed Unit. Patent 2853007 C1 Russian Federation. 2025 December 17. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/hwlpdg>
18. Bulatov S., Nechaev V., Savinyh P., Rucins A. Research Results of Experimental Automated System for Dosing Bulk Materials. In: *Engineering for Rural Development: Conference: 20th International Scientific Conference. Jelgava; 2021. p. 199–204.* <https://doi.org/10.22616/ERDev.2021.20.TF043>
19. Bulatov S.Yu., Nechaev V.N., Zykin A.A., Sergeev A.G. Investigation of Kinematic Characteristics of Screw Dispensers for Sustainable Agrarian-and-Feed Production. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing Ltd; 2022:042028. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/9814/042028>

Об авторах:

Вольвак Сергей Федорович, кандидат технических наук, профессор инженерного факультета Белгородского государственного аграрного университета имени В. Я. Горина (308503, Российская Федерация, п. Майский, ул. Вавилова, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6955-7144>, Researcher ID: OKT-0957-2025, Scopus ID: 57209270770, volvak.s@yandex.ru

Пастухов Александр Геннадиевич, доктор технических наук, профессор инженерного факультета Белгородского государственного аграрного университета имени В. Я. Горина (308503, Российская Федерация, п. Майский, ул. Вавилова, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8249-8970>, Researcher ID: ADV-6694-2022, Scopus ID: 57202643377, pastuhov_ag@belgau.ru

Бахарев Дмитрий Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры автомобильного транспорта Луганского государственного университета имени Владимира Даля (291034, Российская Федерация, г. Луганск, квартал Молодежный, д. 20 а), ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4263-740X>, baharevdn_82@mail.ru

Тимашов Евгений Петрович, доктор технических наук, доцент инженерного факультета Белгородского государственного аграрного университета имени В. Я. Горина (308503, Российская Федерация, п. Майский, ул. Вавилова, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0740-8714>, Researcher ID: ABE-2104-2021, timachov@mail.ru

Кощаев Иван Александрович, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент технологического факультета Белгородского государственного аграрного университета имени В. Я. Горина (308503, Российская Федерация, п. Майский, ул. Вавилова, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0377-6088>, Researcher ID: ABU-3398-2022, Scopus ID: 57221203996, koshchaev@belgau.ru

Вклад авторов:

С. Ф. Вольвак – формулирование идеи 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.

А. Г. Пастухов – контроль, лидерство и наставничество в процессе планирования и проведения исследования; создание и подготовка рукописи: критический анализ черновика рукописи, внесение замечаний и исправлений членами исследовательской группы, в том числе на этапах до и после публикации.

Д. Н. Бахарев – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов; создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования и полученных данных.

Е. П. Тимашов – осуществление научно-исследовательского процесса, включая сбор данных; создание и подготовка рукописи.

И. А. Кощаев – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 28.10.2025; поступила после рецензирования 19.11.2025;
принята к публикации 25.11.2025*

About the authors:

Sergey F. Volvak, Cand.Sci. (Eng.), Professor of the Faculty of Engineering, Belgorod State Agrarian University named after V. Gorin (1 Vavilova str., Maiskiy 308503, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6955-7144>, Researcher ID: OKT-0957-2025, Scopus ID: 57209270770, volvak.s@yandex.ru

Alexander G. Pastukhov, Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Faculty of Engineering, Belgorod State Agrarian University named after V. Gorin (1 Vavilova str., Maiskiy 308503, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8249-8970>, Researcher ID: ADV-6694-2022, Scopus ID: 57202643377, pastuhov_ag@belgau.ru

Dmitriy N. Bakharev, Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Department of Road Transport, Lugansk Vladimir Dahl State University (20 a Molodezhny District, Lugansk 291034, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4263-740X>, baharevdn_82@mail.ru

Evgeny P. Timashov, Dr.Sci. (Eng.), Docent of the Faculty of Engineering, Belgorod State Agrarian University named after V. Gorin (1 Vavilova str., Maiskiy 308503, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0740-8714>, Researcher ID: ABE-2104-2021, timachov@mail.ru

Ivan A. Koshchaev, Cand.Sci. (Eng.), Docent of the Faculty of Engineering, Belgorod State Agrarian University named after V. Gorin (1 Vavilova str., Maiskiy 308503, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0377-6088>, Researcher ID: ABU-3398-2022, Scopus ID: 57221203996, koshchaev@belgau.ru

Authors contribution:

S. F. Volvak – ideas; formulation or evolution of overarching research goals and aims; conducting a research and investigation process, specifically performing the experiments, or data/evidence collection; preparation, creation and presentation of the published work, specifically writing the initial draft (including substantive translation).

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

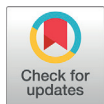
D. N. Bakharev – conducting a research and investigation process, specifically performing the experiments; preparation, creation and / or presentation of the published work, specifically visualization / data presentation.

E. P. Timashov – preparation, creation and / or presentation of the published work; conducting a research and investigation process, specifically performing data.

I. A. Koshchaev – conducting a research and investigation process, specifically performing the experiments.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 28.10.2025; revised 19.11.2025; accepted 25.11.2025

**ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ /
TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT**<https://doi.org/10.15507/2658-4123.26362.300-326>EDN: <https://elibrary.ru/pahvyj>

УДК / UDK 004.9:519.218.82

*Оригинальная статья / Original article***Алгоритмизация методики
интерполяционных моделей при обработке
экспериментальных результатов****В. В. Коновалов** , **А. В. Моисеев**,
В. Ю. Зайцев, **М. В. Донцова***Пензенский государственный технологический университет,
г. Пенза, Российская Федерация, <https://ror.org/04dammg70>* konovalov-penza@rambler.ru*Аннотация*

Введение. Решение проблемы объединения в единую регрессионную модель результатов разных планов экспериментов требует разработки методики планирования экспериментов, оценки влияния интервалов и уровней варьирования исследуемых факторов на возможный характер изменения показателей процесса, а также умения компиляции (совмещения) результатов нескольких последовательных серий исследований в единую систему. Широкое применение численных методов и технологий расчета, а также управление электронной вычислительной машины работой технологических машин позволит оперативно регулировать параметры их работы при сложном взаимодействии факторов.

Цель исследования. Алгоритмизация методики получения интерполяционных моделей при их использовании в автоматизированной обработке результатов экспериментальных исследований с применением математической теории планирования и компиляции моделей.

Материалы и методы. Методика предусматривала аналитическое обоснование интерполяционных функций, описывающих характер изменения показателя в рассматриваемых границах, на основе результатов ранее выполненных исследований, разработку процедуры планирования эксперимента, а также получение интерполяционных выражений и компьютерных моделей.

Результаты исследования. Обоснованы и реализованы мероприятия по получению модели, совмещающей линейную многофакторную модель и частную функцию одного из факторов (влияния частоты вращения барабанного дозатора на его пропускную способность).

Обсуждение и заключение. Осуществленные мероприятия позволили рекомендовать следующую укрупненную последовательность действий: реализация полнофакторного плана для нескольких кодированных факторов с установлением линейной модели процесса; определение предпочтительной зоны их использования;

© Коновалов В. В., Моисеев А. В., Зайцев В. Ю., Донцова М. В., 2026

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

реализация дополнительной серии однофакторных экспериментов внутри ранее исследованного кодированного интервала изучаемого фактора с последующим установлением функциональной зависимости показателя процесса от этого фактора; разработка компьютерной программы совмещения функций обеих серий исследований для подстановки частных функций натуральных показателей факторов в многофакторную линейную модель кодированных факторов; определение характера и числовых значений показателя процесса для всех значений факторов с целью использования результатов в дальнейших вычислениях при математическом описании показателей работы исследуемого устройства. Сочетание моделей линейного многофакторного плана и разных вариантов моделей функций частных переменных (факторов), реализованное в виде компьютерной модели, позволяет получить усложненную многофакторную зависимость, которая в кодированных координатах факторов выглядит линейно, а частные значения показателя процесса внутри участка плана многофакторного эксперимента (-1; +1) описываются частными функциями с текущими натуральными координатами.

Ключевые слова: полнофакторный план эксперимента, многофакторная линейная модель, степенная функция, регрессионная модель, совмещение функций, интерполяционные исследования, компьютерная модель

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Коновалов В.В., Моисеев А.В., Зайцев В.Ю., Донцова М.В. Алгоритмизация методики интерполяционных моделей при обработке экспериментальных результатов. *Инженерные технологии и системы*. 2026;36(2):300–326. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.26362.300-326>

Algorithmization of Interpolation Model Methods in Processing Experimental Results

V. V. Konovalov[✉], A. V. Moiseev,

V. Yu. Zaitsev, M. V. Dontsova

Penza State Technological University,

Penza, Russian Federation, <https://ror.org/04dammg70>

[✉] konovalov-penza@rambler.ru

Abstract

Introduction. To solve the problem of bringing together the results of different experimental designs into a single regression model it is necessary to develop the methods for designing experiments, assessing the influence of intervals and levels of variation of the studied factors on the possible behavior of changes in process indicators, and to have the ability to compile (combine) the results of several sequential series of studies into a single system. The use of numerical methods and calculation technologies, and computerized management of technological machines, will allow adjusting rapidly their operating parameters at complex interplay of factors.

Aim of the Study. The study is aimed at algorithmizing the methodology for developing interpolation models when used for automated processing of the results of experimental studies using the mathematical experiment design theory and compilation of the models.

Materials and methods. In the study, there was used the methodology for the analytical substantiation of expressions of interpolation functions describing the nature of indicator changes within the boundaries under consideration based on the results of previously

completed studies, the development of a procedure for carrying out activities related to planning an experiment and obtaining interpolation expressions and computer models.

Results. There have been substantiated and implemented activities for developing a model combining a linear multifactor model and a particular function of one of the factors (the influence of the drum dispenser rotation frequency on its capacity).

Discussion and Conclusion. The implemented activities allowed us to recommend the following sequence of actions: implementing a full-factorial design for several coded factors with developing the process linear model, determining the preferred zone of their use; implementing an additional series of single-factor experiments within the previously investigated coded interval of the factor under study and the subsequent finding of the functional dependence of the process indicator on this factor; developing a computer program for combining the functions of both series of studies for the substitution of partial functions of the natural indicators of the factors into a multifactorial linear model of coded factors; determining the nature and numerical values of the process indicator for all factor values in order to use the results for further calculations in the mathematical description of the studied device operation, for example, a continuous mixer. The combination of linear multifactorial design models and different versions of functions of specific variables (factors), implemented as a computer model, makes it possible to obtain a complicated multifactorial dependence, which looks linear in the coded coordinates of the factors, and the partial values of the process indicator within the section of the multifactorial experiment design (-1; +1) are described by partial functions with current natural coordinates.

Keywords: full-factorial experimental design, multifactorial linear model, power function, regression model, combination of functions, interpolation studies, computer model

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

For citation: Konovalov V.V., Moiseev A.V., Zaitsev V.Yu., Dontsova M.V. Algorithmization of Interpolation Model Methods in Processing Experimental Results. *Engineering Technologies and Systems*. 2026;36(2):300–326. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.26362.300-326>

ВВЕДЕНИЕ

Любые экспериментальные исследования процессов с использованием средств механизации сельского хозяйства требуют статистической обработки. В исследованиях нередко ставятся экстремальные задачи, однако при их отсутствии потребность в функциональном описании процесса (интерполяционных исследованиях) сохраняется. При этом используются как двухуровневые, так и многоуровневые планы экспериментов. Двухуровневое планирование достаточно компактное и менее затратное. Его недостатком является возникновение некорректного описания влияния отдельных факторов внутри исследуемой зоны их изменения. При наличии функционального описания процесса ставится задача построения совокупной модели, сочетающей в себе многофакторную линейную модель и частные функциональные зависимости для отдельных факторов.

Указанный подход позволяет решить проблему точности расчетов текущих (в промежутках между точками плана эксперимента) показателей работы устройств, описываемых регрессионными уравнениями, с целью применения этих показателей в последующих расчетах и математическом моделировании устройств и процессов в сельском хозяйстве, а также совмещения результатов разных серий исследований в единую модель.

Целью исследования является алгоритмизация методики получения единых интерполяционных моделей исследуемых процессов для их использования в автоматизированных системах расчета на основе совокупной компьютерной обработки результатов нескольких серий экспериментальных исследований с применением математической теории планирования.

Учитывая привлечение молодых исследователей для решения научных задач, а также их владение современными технологиями, возникает потребность передачи им знаний по планированию экспериментов, влиянию интервалов и уровней варьирования исследуемых факторов на возможный характер изменения показателей процесса, а также умений компиляции (совмещения) результатов нескольких последовательных серий исследований в единую систему. Получение аналогичных сведений позволяет на современном уровне решить научную проблему объединения в единую регрессионную интерполяционную модель используемых ранее последовательных, но разрозненных планов экспериментов, которые получены в процессе исследований. Ранее каждый такой план эксперимента позволял получать свою регрессионную модель, но они существовали независимо друг от друга [1; 2]. Для дальнейшего численного моделирования процессов и проведения расчетов на основе изменяющихся условий и данных требуется получение объединенных совокупных моделей, полученных на всей базе интерполяционных исследований. В последние годы получило широкое распространение управление ЭВМ работой технологических машин, в силу чего используются численные методы расчета взаимосвязи показателей процессов, что создает возможность оперативного регулирования параметрами работы машин при сложном взаимодействии факторов. Подобная задача (в качестве примера) реализуется при автоматической настройке многокомпонентных дозаторов непрерывного действия для обеспечения потребной рецептуры смеси путем коррекции величины подачи дозатора конкретного компонента в общей системе дозаторов.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Традиционно влияние отдельных факторов на показатели процесса изучаются методом факторного анализа, требующим большого количества наблюдений или экспериментальных замеров [1–3].

Для сокращения количества экспериментов широко применяется теория многофакторного эксперимента [4]. Она позволяет изменять все исследуемые факторы одновременно. При этом на каждом уровне проводятся замеры с должным дублированием для достижения требуемой доверительной вероятности. Воспроизводимость результатов исследований проверяется критерием Кохрена [5].

Число уровней варьирования в выбранных планах эксперимента зависит от объекта исследования, конечной цели, формализующей процесс работы математической модели, и может быть равно двум, трем и даже пяти при использовании планов со звездными точками. При этом используются как планы полнофакторного эксперимента, так и его дробные выборки [6; 7]. Чтобы снизить количество случайных ошибок применяется рандомизированный сценарий.

При сокращении объема экспериментальных исследований во многих планах эксперимента количество уровней варьирования часто принимают равное двум. Так, в результате обработки такой матрицы получаются линейные модели [6]. В ряде случаев формируются модели в виде полинома первого порядка с эффектами, учитывающими парное влияние факторов на рассматриваемый отклик [7; 8]. В центре плана необходим контроль для проверки соблюдения линейности результата. Если уже заранее известен характер зависимости (линейная, степенная, логарифмическая и др.) показателя процесса от изучаемых факторов, и при обработке данных используются не натуральные значения факторов, а их производные (логарифмирование значений параметров или показателей и др.), то такой подход рационален.

Используемые модели для описания процессов разнообразны: экспоненциальные, полиномиальные, степенные и др. Соответственно, при использовании натуральных (либо кодированных) значений факторов и сложных взаимосвязях показателей работы устройств с изменяемыми факторами двухуровневые планы уже не могут использоваться для получения нелинейных моделей. Стоит учитывать, что регрессионные модели не описывают реальную физику процессов, а лишь моделируют формулы (функции) на основе изначально выбранного типа, тарирова значения коэффициентов модели. Поэтому всегда имеется расхождение опытных данных и расчетных значений по модели.

Многие исследователи для лучшего описания процесса используют трехуровневые планы, а также планы со звездными точками для получения полиномов второго порядка [9–11]. При этом проводится проверка его адекватности по критерию Фишера и взаимосвязи результата с факторами по коэффициенту корреляции. Функциональные модели получают как в кодированном виде факторов, так и в натуральных значениях [8].

Некоторые ученые свою деятельность направляют на совершенствование критериев оптимальности для планов эксперимента. Для этого модернизируются планы и способы повышения точности оценки коэффициентов уравнений регрессии [12; 13].

В настоящее время получены регрессионные модели с учетом вероятностных методов¹. При этом заложены зависимости в виде показательных или экспоненциальных функций [14–16]. П. Н. Солонщиков, С. Ю. Булатов и А. Н. Пронин получили параболические зависимости на участках с отсутствующими экстремумами. Анализ исследуемых процессов иногда показывает вероятность гиперболического характера описываемых процесс функций [17; 18]. Нередко применяются тренарная диаграмма количественного сочетания (для трех факторов) и кореллограммы (матрицы корреляции) для оценки линейности связей [19]. Ученые из Карагандинского технического университета используют теорию размерности для сокращения количества независимых факторов при проведении многофакторного эксперимента [20].

¹ Химченко А.В., Шилин И.В. Сравнительная оценка применения полнофакторного эксперимента и метода Соболя для получения уравнения линейной регрессии. В: Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: материалы междунар. науч.-практ. конф. Воронеж: Воронежский гос. аграрный ун-т им. Императора Петра I; 2023. С. 406–414. <https://elibrary.ru/xcmqtqu>

Следует отметить, что эксперимент может проводиться как натурно [21; 22], так и теоретически [23–25]. В исследованиях зарубежных авторов отмечается возможность применения полиномиальной зависимости, способствующей лучшему копированию экспериментальных данных на относительно узких участках, имеющих экстремум [26]. При этом описывается применение степенной и показательной функций [27; 28]. Ученые из Китая используют планирование эксперимента [29]. В ряде случаев проводится статистическая обработка полученных данных для получения достоверных результатов [30]. Нередко сравниваются теоретические и экспериментальные результаты [31; 32]. При моделировании применяется теория графов, которая позволяет превратить разрозненные наблюдения в структурированную сеть, где объекты становятся вершинами, а взаимодействия между ними – ребрами взаимодействий факторов [33].

Следовательно, наблюдается постоянное развитие теории многофакторного эксперимента и попытки учесть особенности исследуемых процессов, повысить точность результатов и уточнить характер регрессионных выражений, подтверждающих теоретические зависимости.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объекты исследования

Предметом исследования является подача дозатора концентрированных кормов. В качестве объекта рассматривается взаимодействие системы частных и компилированной регрессионных моделей дозированной подачи концентрированных кормов.

Методы, оборудование и процедура исследования

Методикой исследований предполагалось применение аналитических методов для обоснования компиляции интерполяционных функций, с помощью которых дается описание изменения значений показателя процесса (в качестве примера – подача (производительность) дозатора).

Предусматривалось аналитическое рассмотрение характера изменения подачи барабанного дозатора с щелеобразным выгрузным отверстием в зависимости от частоты вращения его барабана. Изучалось влияние на получаемую модель выбора интервалов и уровней варьирования факторов, а также на тип уравнения его описания. Аналитически выявлялись последствия частных ошибок в процедуре планирования, реализации эксперимента и обработки его данных, выбора типа уравнения. Реализация компиляции регрессионных моделей происходила в математическом пакете Mathcad. Обосновали последовательности (алгоритм) выполнения мероприятий для реализации компилированной регрессионной модели на основе интерполяционных исследований.

Предварительная обработка экспериментальных данных производилась компьютерной программой Statistika 5.5, ее специализированными модулями: Quick Basic Stats (быстрые основные статистики), Nonlinear Estimation (нелинейное оценивание), Multiple Regression (множественная регрессия) по заложенным

в программе методикам. Использован ГОСТ Р 54783-2011². Для проверки адекватности получаемых моделей образуются выборки расчетных и экспериментальных данных сравнивали с использованием функций Excel (русифицированной версии обозначения):

- F-тест – определение доверительной вероятности сходства выборок по закону Фишера;
- КОРРЕЛ – коэффициент корреляции, определяющий силу, тесноту, связи;
- КВПИРСОН – коэффициент детерминации, определяющий долю изменений одного показателя влиянием другого.

Основой исследований являлись экспериментальные данные влияния частоты вращения на производительность дозатора³. Был взят барабанный дозатор-метатель непрерывного действия (рис. 1) диаметром 0,2 м с узким выгрузным отверстием в виде щели вдоль оси вращения (с малой шириной $S = 0,16$ м). Для него установили характер зависимости производительности (пропускной способности, подачи) устройства от частоты вращения рабочего органа на сухом сыпучем продукте (рис. 2)⁴. Указанная конструкция является частным случаем барабанного дозатора и имеет специфические особенности для непрерывной подачи материала. Малая ширина щели S препятствует полному свободному выгрузению материала из межлопастного пространства при проходе лопастями зоны щели.

Производительность (пропускная способность) барабанного дозатора Q , кг/с, описали выражением⁵:

$$Q = (0,25\pi BD^2 - V_{po})n\varphi\rho, \quad (1)$$

где B и D – ширина и диаметр барабана соответственно, м; V_{po} – объем, занимаемый рабочим органом, м³; n – частота вращения рабочего органа, с⁻¹; φ – степень заполнения барабана, $\varphi = 0,7...0,9$; ρ – плотность вороха корма, кг/м³.

Проанализировали график изменения реальной пропускной способности указанного дозатора-метателя с двумя участками (рис. 1), на первом I из которых пропускная способность увеличивалась пропорционально частоте вращения его рабочего органа. Это свидетельствует о том, что на данном участке степень заполнения материалом внутреннего межлопастного пространства дозатора практически не изменилась. Подобные условия наблюдались до частоты вращения примерно 80 мин⁻¹. С дальнейшим ростом частоты вращения (участок II) пропускная способность уменьшалась из-за снижения степени заполнения межлопастного пространства.

² ГОСТ Р 54783-2011. Испытания сельскохозяйственной техники. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200089619> (дата обращения: 15.08.2025).

³ Коновалов В.В. Обоснование технических средств приготовления и выдачи кормов в свиноводстве: моногр. Пенза: Пензенская гос. сельскохозяйственная акад.; 2005. 312 с. <https://elibrary.ru/qlxckx>

⁴ Химченко А.В., Шилин И.В. Сравнительная оценка применения полнофакторного эксперимента и метода Соболя для получения уравнения линейной регрессии.

⁵ Там же.



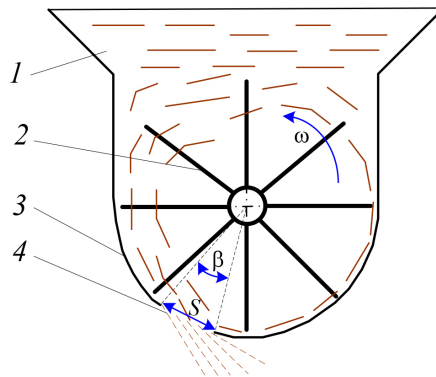
Р и с. 1. Зависимость пропускной способности барабанного дозатора-метателя от частоты его вращения: I – участок линейной связи; II – участок не линейной связи

F i g. 1. Dependence of the drum dispenser-thrower capacity on the frequency of its rotation: I – section of linear connection; II – section of non-linear connection

Источник: рисунки 1, 2 взяты из: Коновалов В.В. Обоснование технических средств приготовления и выдачи кормов в свиноводстве.

Source: the figures 1, 2 are taken from: Konovalov V.V. Technical Justification of Equipment for Preparing and Distributing Feed in the Pig Farming.

Это обусловлено сокращением времени выгрузки материала через щель 4 (рис. 2) вследствие того, что материал не успевает полностью выгрузиться из одного (каждого) межлопастного пространства дозатора. При частоте порядка 120 мин⁻¹ появилась новая тенденция – плавное снижение пропускной способности (штриховая линия). Это связано с тем, что с ростом частоты вращения увеличились центробежные силы, препятствующие поступлению свежего материала в зоне загрузки. При 200 мин⁻¹ процесс стабилизировался.



Р и с. 2. Схема барабанного дозатора-метателя:
1 – бункер сыпучего материала; 2 – лопасти барабана; 3 – корпус;
4 – выгрузное отверстие в виде щели

F i g. 2. Diagram of a drum dispenser-thrower:
1 – bulk material hopper; 2 – drum blades; 3 – body; 4 – discharge opening in the form of a slit

Примечание: ω – угловая скорость лопастей, рад/с; β – центральный угол зоны выгрузки, рад.; S – ширина щели зоны выгрузки, м.

Note: ω – angular velocity of the blades, rad/s; β – central angle of the unloading zone, rad; S – width of the unloading zone gap, m.

Указанная зависимость приведена в качестве примера реализации (с целью анализа ожидаемых результатов) возможного выбора интервала и уровней планирования многофакторного эксперимента. В данном случае целью подобной экспериментальной работы являлось уточнение значений пропускной способности и характера ее изменения (получение функциональных зависимостей для последующего использования числовых результатов без постановки задачи отыскания экстремума функции). Подобные задачи ставятся и для отыскания условий обеспечения требуемой подачи конкретного компонента смеси в смеситель непрерывного действия в соответствии с рецептурой готового продукта.

Согласно методике многофакторного планирования при полном факторном эксперименте использованы двухуровневые планы (например, для 3 факторов) типа 2^3 (табл. 1)⁶.

Т а б л и ц а 1

T a b l e 1

Матрица планирования трехфакторного эксперимента типа 2^3
Design matrix for a three-factor experiment of type 2^3

№	X_0	X_1	X_2	X_3	Y
1	+	–	–	–	
2	+	+	–	–	
3	+	–	+	–	
4	+	+	+	–	
5	+	–	–	+	
6	+	+	–	+	
7	+	–	+	+	
8	+	+	+	+	

Источник: таблицы 1–3 составлены авторами статьи.

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

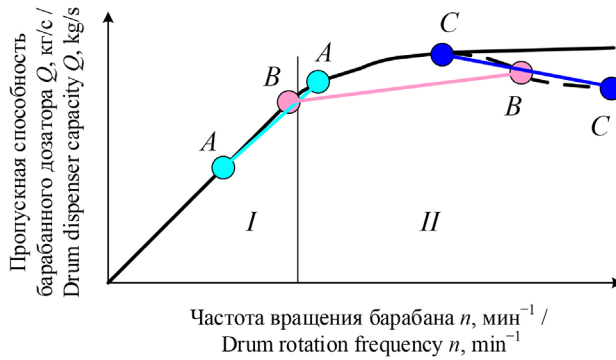
В случае отсутствия предварительных данных о характере зависимости, исследователь может выбрать интервалы и уровни варьирования факторов произвольным образом (ориентируясь лишь на рекомендации выбора уровней факторов от предполагаемых интервалов варьирования). Тогда возможны три варианта событий в зависимости от выбранных интервалов, например частоты вращения рабочего органа дозатора (рис. 3):

– уровни варьирования – *АА*. Интервал варьирования фактора практически полностью лежит на линейном участке изменения производительности.

– уровни варьирования – *ВВ*. Интервал варьирования производительности охватывает ее возвышение («гору, холм»).

– уровни варьирования – *СС*. Интервал варьирования располагается на ниспадающем участке производительности.

⁶ Коновалов В.В. Практикум по обработке результатов научных исследований с помощью ПЭВМ. Пенза: Пензенская гос. сельскохозяйственная акад.; 2003. 176 с. <https://elibrary.ru/rwhtib>

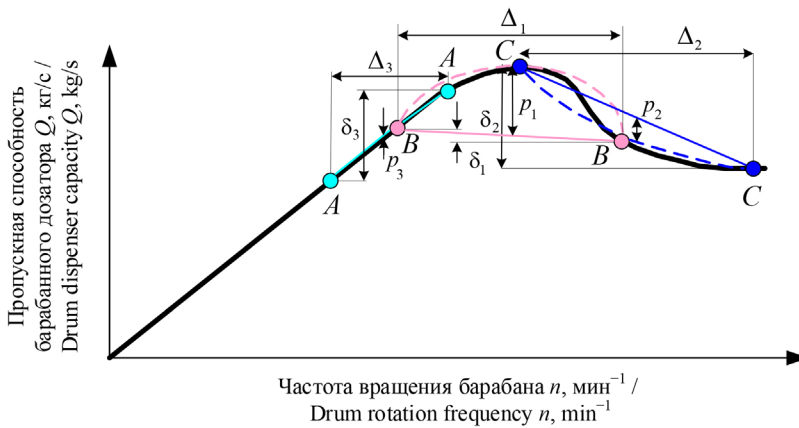


Р и с. 3. Зависимость пропускной способности барабанного дозатора Q от частоты его вращения n и возможные варианты выбора интервала изменения уровней фактора n

F i g. 3. The dependence of the capacity of the drum dispenser Q on its rotation speed n and possible options for choosing the interval of changing the levels of the factor n

Источник: графики для рисунков 3, 4 составлены авторами статьи в программе Microsoft Visio.
Source: the graphs for figures 3, 4 were compiled by the authors of the article in Microsoft Visio.

При подробном рассмотрении примера на схеме с большим масштабom (рис. 4) выяснили, что интервалы варьирования факторов: $\Delta_1 = \Delta_2 = 2\Delta_3$. При этом перепад значений показателя: δ_2, δ_3 – существенны; $\delta_1 \rightarrow \min$, т. е. несущественен.



Р и с. 4. Влияние выбора интервалов и уровней варьирования фактора частоты вращения n на производительность устройства

F i g. 4. The influence of the choice of intervals and levels of variation of the rotation frequency factor n on the device performance

Примечание: $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$ – варианты интервалов варьирования; $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ – перепады значений параметров производительности на краях интервалов варьирования; p_1, p_2, p_3 – разности фактических и расчетных значений производительности на интервалах варьирования.

Note: $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$ – variation interval options; $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ – differences in the values of the performance parameters at the edges of the variation intervals; p_1, p_2, p_3 – differences in the actual and calculated values of the performance indicator at the variation intervals.

В случае реализации плана отсеивающего эксперимента (при отсутствии экспериментальной проверки в центре плана) при варианте уровней BB данный фактор имеет риск отсестаться из-за незначительности разности уровней начала и конца участка исследований ($\delta_1 \rightarrow \min$). Проверка в центре участка выявляет значительные расхождения p_1 и требует использования полиномов второго порядка (параболической функции) и соответствующих планов экспериментов (как минимум, добавление дополнительных точек плана).

При варианте уровней CC данный фактор может оказаться значимым, при этом различия фактических и расчетных значений показателя p_2 существенны, что говорит о нелинейном характере исследований и необходимости включения дополнительных точек внутри (либо снаружи – звездные точки) выбранного плана $[-1; +1]$.

При варианте уровней AA наблюдается хорошая сходимость фактических и расчетных значений $p_3 \rightarrow \min$, соответственно, указанный объем исследований (на двух уровнях) достаточен. При отсеивающем эксперименте данная проверка проводится в центре эксперимента для проверки линейности модели.

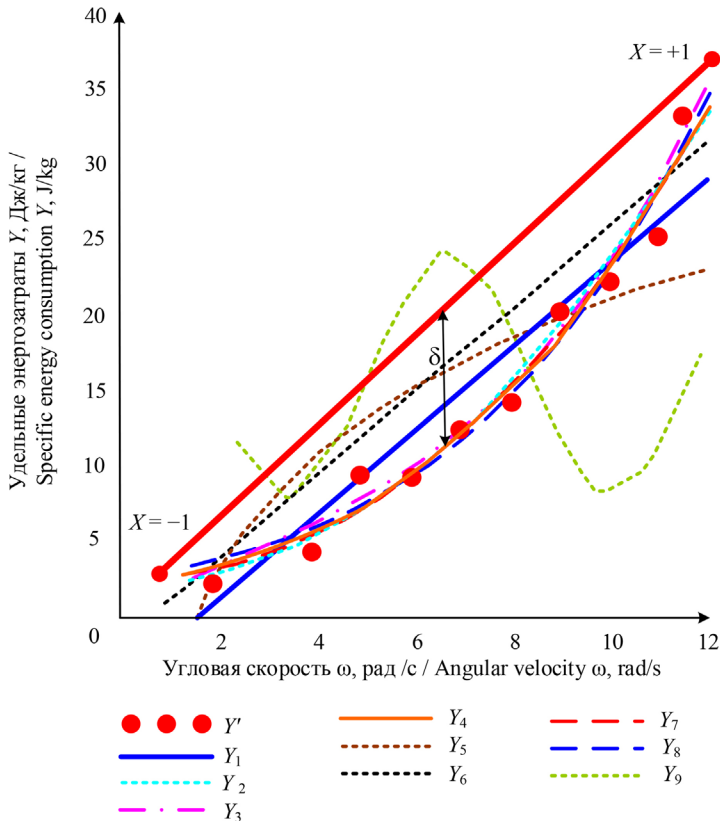
Варианты получения параболических моделей с учетом точек в центре интервалов условно представлены пунктирными линиями соответствующего цвета. Видна угроза несоответствия (расхождения Δ) фактических и расчетных значений на отдельных интервалах участков плана. Соответственно, желательно получить дополнительные данные по новым (отсутствующим в исходном двухуровневом плане) точкам. Использование логарифмической, показательной, степенной и других функций, характер которых соответствует теоретическому описанию данного процесса, может существенно повысить совпадение расчетных и экспериментальных данных [19].

Пример описания неких (иных) опытных данных на участке плана различными функциями приведен на рисунке 5.

На графике видны точки исходных значений $X[-1; +1]$ однофакторного исследования, графики аппроксимации исходных значений разными типами однофакторных регрессионных функций $Y'-Y_0$, а также наложение на график линейного фрагмента многофакторного двухуровневого плана $[-1; +1]$, в границах которого проводились однофакторные исследования. Величина расхождения δ линейной зависимости показателя процесса между краями исследуемого интервала значений фактора двухуровневого плана и реальным значением показателя процесса в середине участка (или функциями, например, степенной) может быть существенной. Поэтому решение полиномиальной задачи требует дополнительного уточнения линейной модели полнофакторного эксперимента за счет ее коррекции для более достоверного описания значений показателя внутри границ двухуровневого плана эксперимента.

Хотя исходные данные по краям интервала $X[-1; +1]$ соответствуют краям плана факторных исследований Y' , графики аппроксимации разных типов выражений не проходят ни через точки $X = -1$, $X = +1$, ни через Y' , так как всегда имеется погрешность. График Y_0 , адекватно проходя по исходным (опытным) точкам Y' факторной зависимости, полностью не совпадает ни с опытными точками,

ни с точками $X = -1$ и $X = +1$. Поэтому при совмещении нескольких выражений в одну обобщенную математическую модель требуется в обязательном порядке осуществлять их коррекцию – сдвиг.



Р и с. 5. Влияние абсциссы X' на ординату Y , описанное моделями

F i g. 5. The influence of the abscissa X' on the ordinate Y described by the models

Примечание: Y' – исходные точки; Y_1 – полином первого порядка по исходным точкам; Y_2 – полином второго порядка; Y_3 – полином третьего порядка; Y_4 – экспоненциальная функция; Y_5 – логарифмическая функция (сокращенная); Y_6 – логарифмическая функция (полная); Y_7 – степенная функция; Y_8 – логистическая функция; Y_9 – синусоидная; X – границы $[-1; +1]$ двухуровневого многофакторного плана и его линейная модель на интервале; δ – расхождение численных значений показателя в середине интервала двухуровневого плана по его линейной модели с исходными (экспериментальными) точками (в т. ч. и с частными моделями).

Note: Y' – original points; Y_1 – first-order polynomial over the initial points; Y_2 – second-order polynomial; Y_3 – third-order polynomial; Y_4 – exponential; Y_5 – logarithm (abbreviated); Y_6 – logarithm (full); Y_7 – power; Y_8 – logistic; Y_9 – sine wave; X – boundaries $[-1; +1]$ of the two-level multifactorial design and its linear model on the interval; δ – the discrepancy between the numerical values of an indicator in the middle of the interval of a two-level plan according to its linear model and the initial (experimental) points (including with particular models).

Источник: рисунок 5 взят из: Коновалов В.В. Практикум по обработке результатов научных исследований с помощью ПЭВМ.

Source: the figure 5 was taken from: Konovalov V.V. Workshop on Processing of Research Results Using a Personal Computer.

Сочетание линейного многофакторного плана в логарифмической сетке и логарифмирования разных вариантов функций частных переменных (факторов) позволяет получить усложненную многофакторную модель, которая в логарифмических координатах выглядит линейно, а частные значения показателя внутри кодированного участка плана $-1 \dots +1$ описываются частными функциями.

Провели подобные указанным выше преобразования на примере участка CC (рис. 4), используя степенную функцию.

Внутри участка плана многофакторного эксперимента частные показатели функции Y_1, Y_2, Y_3 для трех независимых факторов x_1, x_2, x_3 описывали частными выражениями (например, степенными функциями) для интервала изменения значений факторов $(-1; +1)$:

$$Y_1 = A_{01} + k_1 x_1^{c_1}; \quad Y_2 = A_{02} + k_2 x_2^{c_2}; \quad Y_3 = A_{03} + k_3 x_3^{c_3}. \quad (2)$$

где A_{01}, A_{02}, A_{03} – свободные члены степенных функций; k_1, k_2, k_3 – множители степенных функций; c_1, c_2, c_3 – показатели степени степенных функций.

Зависимости (2) представили в следующем виде:

$$Y_1 - A_{01} = k_1 x_1^{c_1}; \quad Y_2 - A_{02} = k_2 x_2^{c_2}; \quad Y_3 - A_{03} = k_3 x_3^{c_3}. \quad (3)$$

В связи с тем, что интервал изменения показателей согласно плану многофакторного эксперимента и фактически исследованному аппроксимированному участку могут не совпадать, использовали уточняющие коэффициенты K , которые учитывали соотношение ординаты для текущего значения абсцисс к ординате на начало участка (-1) плана:

$$K_1(x_1) = \frac{Y_1(-1) + (Y_1(+1) - Y_1(-1))k_1 x_1^{c_1}}{Y_1(-1)};$$
$$K_2(x_2) = \frac{Y_2(-1) + (Y_2(+1) - Y_2(-1))k_2 x_2^{c_2}}{Y_2(-1)};$$
$$K_3(x_3) = \frac{Y_3(-1) + (Y_3(+1) - Y_3(-1))k_3 x_3^{c_3}}{Y_3(-1)}.$$

При таком подходе после построения модельной кривой проводится коррекция разности модельной и истинной значений их средних, т. е. сдвиг результатов. Для этого используются указанные коэффициенты, либо совмещение средних для исходных и расчетных наборов (выборки) значений.

Прологарифмировали значения показателей частных функций и получили частные функции по текущим координатам:

$$x_1 = \ln(Y_1 - A_{01}) = \ln(k_1) + (c_1 \cdot \ln(x_1)),$$
$$x_2 = \ln(Y_2 - A_{02}) = \ln(k_2) + (c_2 \cdot \ln(x_2)),$$
$$x_3 = \ln(Y_3 - A_{03}) = \ln(k_3) + (c_3 \cdot \ln(x_3)).$$

В результате обработки результатов эксперимента согласно плана 2^3 получили многофакторную линейную модель вида:

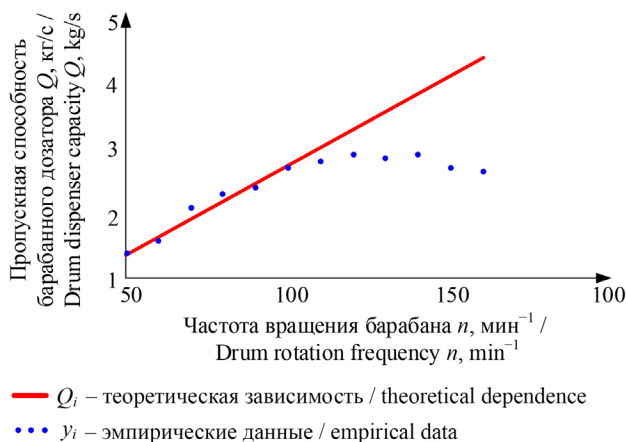
$$Y = k_0 + k_1X_1 + k_2X_2 + k_3X_3, \quad (4)$$

где значения факторов X_1, X_2, X_3 имели два значения ($-1; +1$). Соответственно, вместо значений факторов X_1, X_2, X_3 использовали ранее указанные соответствующие частные функции (3) переменных (факторов). k_0, k_1, k_2, k_3 – коэффициенты уравнения регрессии.

Рассмотрели пример конкретной реализации сочетания степенной функции и функции многофакторной линейной модели, используя математический пакет Mathcad.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По результатам экспериментальных исследований дозатора реализованы два плана эксперимента: многофакторный план для трех факторов на двух уровнях и однофакторный план на 12 уровнях. На основе реализации данных однофакторного плана эксперимента была разработана программа моделирования и цифрового расчета в математическом пакете Mathcad для степенной регрессионной зависимости пропускной способности барабанного дозатора от частоты вращения его барабана (рис. 6) по экспериментальным данным.



Р и с. 6. Влияние частоты вращения барабана дозатора на его пропускную способность

F i g. 6. The influence of the rotation frequency of the dosing drum on its capacity

Источник: графики для рисунков 6–10 составлены авторами статьи в программе Mathcad.
 Source: the graphs for figures 6–10 were compiled by the authors of the article in Mathcad.

При этом исходные и данные теоретической зависимости при постоянной степени заполнения дозатора визуализированы в виде расчетных и теоретических значений Q_i по формуле (1) и экспериментальных данных Y_i , где i – номера набора, выборки, уровней частоты вращения барабана n_i (рис. 6, табл. 2). Для дальнейшей математической обработки исходные данные преобразуются в виде векторов x', y' .

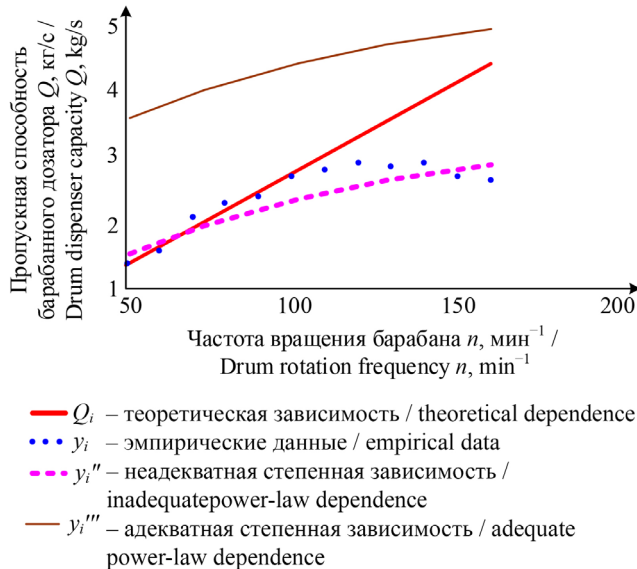
Матрица однофакторного эксперимента

Matrix of one-factor experiment

$n, \text{мин}^{-1} / n, \text{min}^{-1}$	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160
$y, \text{кг/с} / y, \text{kg/s}$	1,4	1,6	2,1	2,3	2,4	2,7	2,8	2,9	2,85	2,9	2,7	2,65

Ввиду изменения степени заполнения материалом внутреннего пространства дозатора при частоте вращения более 100 мин^{-1} вместо постоянного роста теоретической зависимости Q_i при стабильной степени заполнения наблюдается стабилизация значений подачи эмпирических данных Y_i , что расходится с теоретическими ожиданиями для постоянного значения степени заполнения внутреннего пространства дозатора. Т. е. изменяется степень заполнения межлопастного пространства барабана дозатора.

Полученная регрессионная степенная зависимость на основе экспериментальных данных представлена на рисунке 7.



Р и с. 7. Влияние частоты вращения барабана дозатора на его пропускную способность

F i g. 7. The influence of the rotation frequency of the dosing drum on its capacity

Для этого определились с количеством (табл. 2) результатов данных N , числом степеней свободы ν_1, ν_2 векторов, потребным уровнем значимости ошибки α для аппроксимации экспериментальных данных, степенной функцией (pwrfit – встроенная функция Mathcad). По результатам аппроксимации выявили значения коэффициентов уравнения регрессии и дополнительно их зафиксировали виде коэффициентов $A_1 = 56\,760$, $k_1 = 2,167 \cdot 10^{-5}$, $c_1 = -56\,760$, записали уравнение регрессионной степенной функции y_i''' для i -х значений частоты вращения в соответствии с формулой (2). Для последующей оценки полученной кривой находили средние значения y_{av} , $y_{av} = 2,442$ и среднеквадратические значения выборок

подачи S , $S_y = 0,507$ как исходных значений (табл. 2), так и текущих расчетных значений подачи по регрессионной степенной функции $y'_{av} = 5,651$; $S'_y = 3,383$. Встроенной функцией (corr) определили корреляцию между выборками подачи: расчетной и исходной. Коэффициент корреляции Пирсона $R = 0,908$. Встроенной функцией qF определили табличное (критическое) значение критерия Фишера для оценки адекватности модели $F_{cr} = 4,844$. По соотношению среднеквадратических отклонений сравниваемых выборок рассчитали критерий Фишера $F = 6,676$. Сопоставляя расчетное значение F и критическое значение критерия Фишера F_{cr} , сделали вывод по оценке адекватности регрессионной модели.

Так как условие неравенства не выполнено (т. е. результирующее условие равно нулю, а не единице: $F \leq F_{cr} = 0$), указанное уравнение регрессии является неадекватным. Неадекватность регрессионной модели и полученного результата видна также графически – y'''_i (рис. 7). Для коррекции результата смещением применили формулу (3). Использовали соотношение средних значений по выборкам.

Смещение определяли $dy' = y_{av} - y'''_{av} = -3,209$ по несоответствию средних для выборок исходных $y_{av} = 2,442$ и расчетных $y'_{av} = 5,651$ значений подачи, и по нему уточняли уравнение степенной функции y''_i путем добавления его значения dy' в соответствии с формулой (3). Тип уравнения (2) сохранился, изменилась лишь величина значения коэффициента свободного члена за счет уточнения.

Проведенная проверка полученного регрессионного уравнения по значению критерия Фишера, $F = 1,102$, и коэффициента корреляции Пирсона, $R = 0,908$, подтвердила адекватность уточненной модели $F \leq F_{cr} = 1$. Числовые значения скорректированной степенной функции y'' для текущих значений i частоты вращения на графике стали располагаться в интервале изменения подачи, характерном для Y_i . Тем самым, выявлена адекватная функция степенного типа для описания подачи дозатора.

При реализации однофакторного эксперимента в процессе поисковых опытов по определению зоны проведения последующего многофакторного эксперимента в направлении рационального интервала изменения частоты вращения произошло смещение рабочей зоны в сторону увеличения границ: нижней – к 100 мин^{-1} , а верхней – к 160 мин^{-1} . Соответственно, для совмещения полученной степенной модели с линейной многофакторной требуется пересчет уровней изменения подачи в границах многофакторного плана, т. е. использование не i -й, а j -й нумерации уровней частоты вращения при дальнейшем использовании ранее полученной адекватной степенной модели. Для уровней указанного интервала $100; 110; 120; 130; 140; 150; 160 \text{ мин}^{-1}$ частот вращения подлежит уточнению величина среднего значения $y''_{av} = 2,79$ адекватной степенной модели.

В результате реализации многофакторного плана для трех факторов на двух уровнях (табл. 1, 2) в процессе обработки результатов с помощью программы Statistika 5.5 получено линейное трехфакторное уравнение регрессии (4), связывающее пропускную способность (подачу) Y , кг/с дозатора с кодированными значениями частоты вращения ротора X_1 , длины выгрузного отверстия по ходу движения лопасти X_2 и ширины выгрузного отверстия вдоль оси вращения барабана X_3 , которые в натуральных величинах имеют обозначение n , мин^{-1} , h , м и s , м (табл. 3).

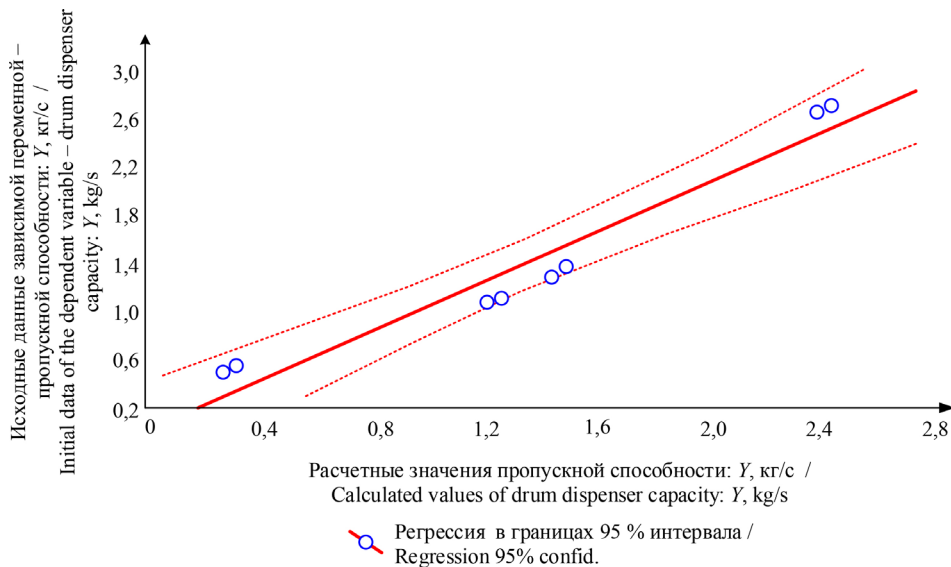
Таблица 3

Table 3

 План и результаты трехфакторного двухуровневого эксперимента
 Design and results of a three-factor two-level experiment

№	n	h	s	X_1	X_2	X_3	Y
1	100	0,019	0,040	-1	-1	-1	0,54
2	160	0,019	0,040	+1	-1	-1	0,50
3	100	0,019	0,100	-1	-1	+1	1,08
4	160	0,019	0,100	+1	-1	+1	1,06
5	100	0,055	0,040	-1	+1	-1	1,35
6	160	0,055	0,040	+1	+1	-1	1,25
7	100	0,055	0,100	-1	+1	+1	2,70
8	160	0,055	0,100	+1	+1	+1	2,65

Расчетные коэффициенты уравнения регрессии определили с помощью указанной компьютерной программы: $k_0 = 1,39122$; $k_1 = -0,02625$; $k_2 = 0,481242$; $k_3 = 0,596239$. Тарирование числовых значений расчетных коэффициентов уравнения регрессии производилось методом наименьших квадратов. Неучтенный финальный остаток – 0,34050009. Анализом исходных и расчетных выборок функциями программы Excel дополнительно подтверждена адекватность данной регрессионной модели ввиду расчета значений доверительной вероятности соблюдения критерия Фишера $F\text{-test} \approx 0,929$ и коэффициента корреляции Пирсона $R \approx 0,966$. Размещение расчетных и исходных данных в границах 95 % интервала, показанное на рисунке 8, это подтверждает.



Р и с. 8. Соответствие исходных и расчетных значений подачи 95 % доверительному интервалу с помощью программы Statistika 5.5

F i g. 8. Correspondence between the initial and calculated feed values and the 95 % confidence interval using the Statistika 5.5 program

На основе полученных данных осуществлено внедрение многофакторной линейной модели в текст программы. Точки результатов аппроксимированных уровней многофакторного плана оказались частично смещены относительно значений как для ранее полученной степенной модели, так и для опытных точек (подобный эффект наблюдается всегда, и это является нормой). Уровни (-1) и $(+1)$ многофакторного плана соответствуют интервалу частот вращения 100 и 160 мин^{-1} .

Приведен вектор кодированных значений частоты вращения X_{1j} внутри интервала его изменения $[-1; +1]$ для последующего расчета значений степенной функции на данном интервале. Кодированные факторы X_2, X_3 принимаются неизменными и соответствующими уровню для исходной степенной функции. Найдено значение средней расчетной величины подачи многофакторной функции Y_{av}'' и потребная величина смещения $dy' = -0,094$ многофакторной модели для совпадения средних величин с фрагментом степенной функции. С учетом смещения уточнена многофакторная функция подачи Y_j''' и найдено ее среднее значение Y_{av}''' .

В силу аппроксимации исходных данных степенной и линейной функциями (даже при соответствии экспериментальных значений в точках интервала значениям эксперимента для однофакторной функции) происходит смещение расчетных значений от реальных данных эксперимента. Поэтому для приравнивания функций требуется дополнительная их корректировка между собой, выражающаяся в линейном δy и угловом $\delta y_z - \delta y_0$ смещении результатов. Для углового смещения требуется выполнить определенную последовательность действий.

Нашли значения степенной функции y''' по исходному уравнению для частот вращения краев интервала многофакторной модели $5,665$ и $6,243$. Для линейной многофакторной модели значения Y''' для краев интервала составляют $2,401$ и $2,348$.

Значение углового смещения для краев интервала:

$$\delta_j = \frac{Y_j'''}{y_j'''} \quad (5)$$

где $\delta y_0 = 0,424$ и $\delta y_z = 0,376$; 0 и z – минимальный и максимальный j -й номер частоты вращения на многофакторном интервале плана, мин^{-1} .

В результате текущие значения степенной однофакторной модели подачи записали:

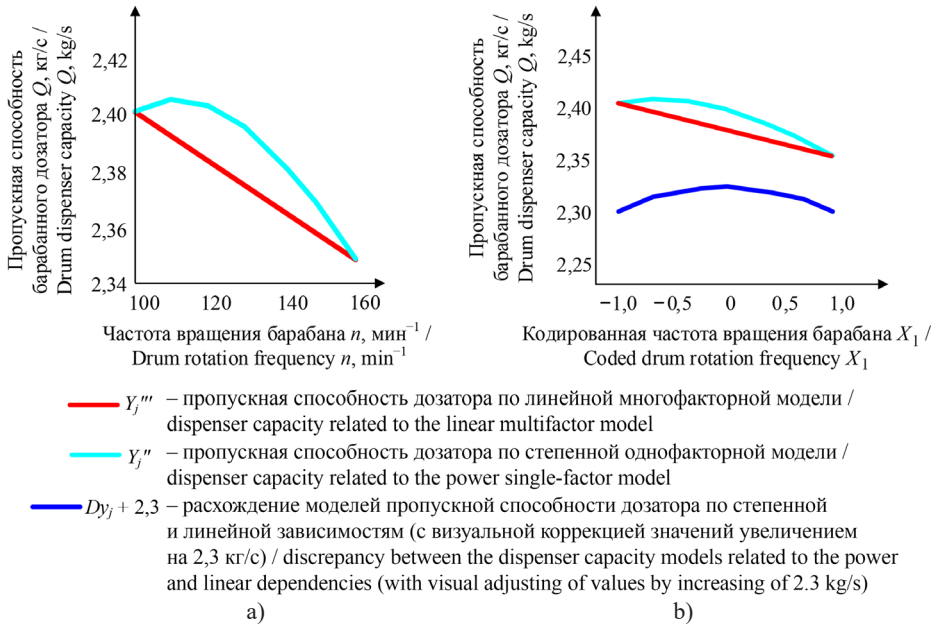
$$y_j''' = (k_1 n_j^{c1} + A_1) \cdot \left(\delta y_0 + \frac{j}{z} (\delta y_z - \delta y_0) \right) \quad (6)$$

Текущие значения линейной многофакторной модели подачи записали:

$$Y_j''' = (k_0 + dy) + k_1 \left[\frac{-n'_0}{n'_0} + \frac{j \cdot 2}{z} \left(\frac{n'_z}{n'_0} - \frac{n'_z - n'_0}{n'_0} \right) \right] + k_2 X_2 + k_3 X_3 \quad (7)$$

Контроль сочетания функций моделей реализован на рисунке 9. Видно, что в результате данной коррекции графики на концах интервала (согласно плану многофакторного эксперимента) совпадают, а в промежутке между ними (между краями) график степенной функции несколько смещается от линейной функции многофакторного плана. Для этого корректируют как степенную функцию Y_{1j}'' , так и многофакторную Y_j''' , совмещая их концы. При этом интервал изменяемых факторов (частота вращения барабана и ее кодированное значение) соответствуют

друг другу. Текущая величина расхождения значений функций внутри границ интервала многофакторного плана – $dy_j + 2,3$ (рис. 9 б). Для визуальной оценки расхождений значений ее принудительно сместили на графике на 2,3 кг/с вверх. Наибольшее расхождение расчетных подач по обеим моделям соответствует середине интервала многофакторного плана, а экстремум числовых значений при 115 мин^{-1} , $X_1 = -0,75$. Многофакторная линейная модель упускает указанный момент, огрубляя его. Графики на рисунках 9 а и 9 б однотипны, различаются лишь графическим масштабированием подачи и натуральным и/или кодированным значением изменяемой частоты вращения.



Р и с. 9. Влияние частоты вращения на пропускную способность дозатора: а) для натуральных значений частоты вращения, мин^{-1} ; б) для кодированных значений частоты вращения при указании величины расхождения подач степенной и линейных функций (с визуальной коррекцией на 2,3 кг/с)

F i g. 9. Influence of the rotation speed on the dispenser capacity: а) for natural values of the rotation speed, min^{-1} ; б) for coded values of the rotation speed when indicating the magnitude of the discrepancy between the feeds of the power and linear functions (with a visual correction of 2.3 kg/s)

Откорректированные результирующие функциональные зависимости представлены на рисунке 10. Для этого преобразовали промежуточную функцию для вставки в линейную многофакторную модель

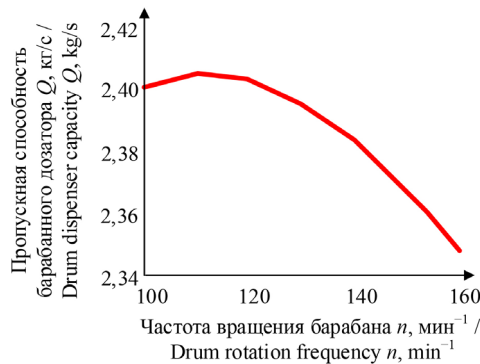
$$X'_{1j} = \frac{(k_1 n_j^{c_1} + A'_1) \cdot \left(\delta y_0 + \frac{j}{z} (\delta y_z - \delta y_0) \right) - (k_0 + dy) + k_2 X_2 + k_3 X_3}{k_1}. \quad (8)$$

Итоговое откорректированное многофакторное уравнение подачи дозатора запишется:

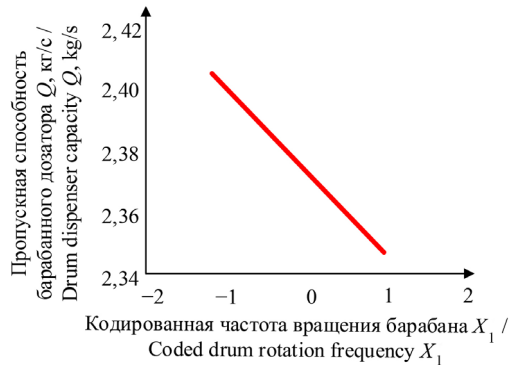
$$Y_j''' = (k_0 + dy) + k_1 X'_{1j} + k_2 X_2 + k_1 X_3. \quad (9)$$



a)



b)



c)

Р и с. 10. Взаимосвязь частоты вращения барабана дозатора с величиной его пропускной способности (подачи) Y , кг/с; а) взаимосвязь натуральных значений частоты вращения барабана n' с его кодированными значениями X_1' ; б) влияние частоты вращения n на пропускную способность Y' ; в) влияние фактора X_1' (кодированное значение частоты вращения n') на пропускную способность Y

Fig. 10. Relationship between the rotation frequency of the dosing drum and the value of its capacity (feed) Y , kg/s) a) relationship of the natural values of the rotation frequency of the drum n' with its coded values X_1' ; b) influence of the rotation frequency n' on the capacity Y' ; c) influence of the factor X_1' (coded value of the rotation frequency n') on the capacity Y

На рисунке 10 б изображена взаимосвязь показателей, полученная на основе указанных формул. Показана степенная зависимость пропускной способности $Y''' = Y$ от натуральных значений частоты вращения n' ротора при линейной связи кодированного значения частоты вращения X'_1 с пропускной способностью дозатора $Y''' = Y$ в j -х точках многофакторного эксперимента (внутри отрезка $X'_1 = [-1; +1]$).

При этом сохраняется линейная зависимость (рис. 10 с) между кодированным фактором X'_1 и показателем процесса – пропускной способностью $Y''' = Y$. Особенностью данной модели является не фиксированная функция, а автоматический пересчет при изменении исходных данных (и в случае уточнения значений коэффициентов регрессии).

Тем самым, подтверждена возможность внесения степенных зависимостей в состав многофакторных линейных моделей и компиляция нескольких регрессионных моделей в единый блок. Подобная подстановка возможна и для других факторов линейной многофакторной модели. При этом степенная зависимость (рис. 12 б) позволяет выявить выраженный экстремум пропускной способности при частоте вращения ротора дозатора около 115 мин^{-1} , что соответствует опытными данным (рис. 7).

ОБСУЖДЕНИЕ

Традиционное получение только регрессионных моделей для практического использования заканчивает синхронизацию моделей нескольких планов эксперимента, в то время как в представленном примере осуществлена компиляция нескольких регрессионных моделей.

По результатам исследования можно рекомендовать следующую последовательность мероприятий для получения и обработки экспериментальных результатов с целью разработки интерполяционных моделей, реализующих совмещение многофакторных линейных регрессионных выражений на основе полнофакторных двухуровневых планов и частных степенных зависимостей отдельных факторов:

- проведение поисковых опытов по отысканию местоположения зоны работоспособности устройства;
- реализация полнофакторного плана с установлением линейной зависимости показателя процесса от нескольких кодированных факторов и установление предпочтительной зоны их использования;
- отыскание на участке многофакторного плана зоны лучших показателей процесса и предпочтительных значений факторов для данной зоны;
- реализация дополнительных серий однофакторных экспериментов внутри ранее исследованного кодированного интервала изучаемого фактора (3–5 точек внутри кодированного интервала $[-1; +1]$ с последующим установлением адекватной функциональной зависимости показателя процесса;
- установление на основе результатов серии однофакторных экспериментов и точек соответствующей выборки из полнофакторного плана вида и получение уравнения функциональной зависимости показателя процесса от соответствующего фактора (натуральные значения показателя процесса при натуральных значениях фактора);

– разработка компьютерной программы совмещения функций реализации обеих серий исследований для подстановки частных функций натуральных показателей факторов в многофакторную линейную модель кодированных факторов;

– определение характера и числовых значений показателя процесса для всех интересующих значений факторов с целью использования результатов в дальнейших вычислениях при математическом описании показателей работы исследуемых устройств, например, смесителя непрерывного действия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сочетание (компиляция) моделей линейного многофакторного плана и моделей разных вариантов функций частных переменных (факторов) может позволить получить усложненную многофакторную модель, которая в кодированных координатах выглядит линейно, а частные значения показателя процесса внутри участка плана многофакторного эксперимента (-1 ; $+1$) описываются частными функциями с текущими натуральными координатами, что позволяет уменьшить погрешность интерполяционных моделей.

Разработанная последовательность (алгоритм) действий исследователей позволяет совместить результаты нескольких последовательных серий (планов) исследований в единую модель и использовать совокупные интерполяционные модели с целью ее использования в автоматизированных системах расчета для повышения точности расчета результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Егошин В.Л., Саввина Н.В., Гржибовский А.М. Анализ главных компонент и факторный анализ в программной среде R. *West Kazakhstan Medical Journal*. 2020;(1):6–14. <https://elibrary.ru/gfcmwd>
2. Власов А.Б. Факторный анализ диагностической модели тепловизионного контроля высоковольтных вводов. *Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета*. 2004;7(3):429–436. URL: <https://vestnik.mauniver.ru/show.shtml?art=403> (дата обращения: 25.07.2025).
3. Мазуркин П.М. Факторный анализ таксационных показателей разновозрастного сосняка Сибири. *Успехи современного естествознания*. 2009;(12):41–48. URL: <https://natural-sciences.ru/article/view?id=14065> (дата обращения: 25.07.2025).
4. Бакенова А.А., Куанышева Д.Г., Плотникова И.В., Редько Л.А., Янушевская М.Н. Изучение факторов, оказывающих наибольшее влияние на качество объекта на основе планирования эксперимента. *Качество и жизнь*. 2021;(2):25–30. <https://doi.org/10.34214/2312-5209-2021-30-2-25-30>
5. Гушин А.В. Методы планирования эксперимента и выбор групп с линейными характеристиками взаимодействия. *Вестник СамГУПС*. 2021;(1):97–103. URL: <https://clck.ru/3SrJjX> (дата обращения: 15.08.2025).
6. Тюльпинова Н.В., Ромашенкова А.А. Прогнозирование параметров качества процесса кислородной резки металла методами теории планирования эксперимента. *Современные материалы, техника и технологии*. 2020;(3):71–77. <https://elibrary.ru/xghms0>
7. Фомченков А.О., Бонадысев К.О. Применение полного факторного эксперимента в анализе сложных линейных цепей. *Устойчивое развитие науки и образования*. 2020;(10):157–163. <https://elibrary.ru/jwvovk>
8. Хецуриани Е.Д., Хецуриани Т.Е., Бондаренко В.Л., Ларин Д.С. Экспериментальные технологии по защите водоприемников речных водозаборов от занесения донными наносами. *Биосферная совместимость: человек, регион, технологии*. 2020;(2):82–92. <https://elibrary.ru/bdsqgk>

9. Русакова Г.Г., Лебедь Н.И., Тронев С.В., Цыбенко А.Ф. Оптимизация режимно-конструктивных параметров автоматизированной барабанной сушилки. *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2020;(1):73–76. <https://elibrary.ru/tzozdv>
10. Румянцев М.И., Колыбанов А.Н. Второе упрощение расчета деформации валков и профиля полосы при прокатке в клети кварто с применением методики планирования эксперимента. *Калибровочное бюро*. 2019;(14):11–15. URL: <https://passdesign.ru/journal/number14> (дата обращения: 15.08.2025).
11. Маслов Г.Г., Палапин А.В., Юдина Е.М., Цыбулевский В.В., Лаврентьев В.П. Оптимизация параметров и режимов работы зубопружинной бороны. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2020;(85):117–121. URL: <https://orensau.ru/ru/nauka/izvestiya-orenburgskogo-gau> (дата обращения: 17.08.2025).
12. Попов А.А. Алгоритмы построения дискретных приближенно Q-оптимальных планов эксперимента при активной идентификации регрессионных моделей многофакторных систем. *Системы анализа и обработки данных*. 2024;2(94):55–68. <https://doi.org/10.17212/2782-2001-2024-2-55-68>
13. Попов А.А. Алгоритмы построения дискретных A-оптимальных планов эксперимента при активной идентификации регрессионных моделей многофакторных систем. *Системы анализа и обработки данных*. 2022;(2):39–54. <https://doi.org/10.17212/2782-2001-2024-2-55-68>
14. Химченко А.В., Оробинский В.И., Остриков В.В., Григорьев Е.А. Планирование эксперимента для определения зависимости изменения щелочного числа моторного масла от эксплуатационных факторов в пределах одного срока замены. *Наука в центральной России*. 2024;(5):94–104. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-5-94-104>
15. Тургунбаев М.С. Статистический анализ результатов резания дисперсного грунта с каменистым включением режущим инструментом землеройной машины. *Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана*. 2023;(5):27–31. <https://doi.org/10.26104/NNTIK.2023.68.15.006>
16. Chupshv A., Konovalov V., Fomina M. Optimization in Work Modeling of a Mixer. *Journal of Physics*. In: “Virtual Simulation, Prototyping and Industrial Design 2017”: IV International Scientific and Practical Conference. Tambov: Institute of Physics Publishing; 2018. Article no. 012010. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1084/1/012010>
17. Солонщиков П.Н. Обоснование конструкции и размеров рабочего колеса установки для приготовления жидких кормовых смесей. *Вестник НГИЭИ*. 2021;(2):17–26. <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2021-2117-17-26>
18. Булатов С.Ю., Пронин А.Н. Результаты исследований шнекового дозатора сухих сыпучих компонентов комбикорма. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2024;25(1):123–133. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.1.123-133>
19. Соколов П.Э., Бажуков Д.М., Солев Д.И., Карапузов В.И. Оптимизация состава гипсоцементно-пуццоланового вяжущего методом планирования эксперимента. *Инженерный вестник Дона*. 2024;(1):290–304. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2024/8940> (дата обращения: 24.08.2025).
20. Кадыров А.С., Сарсембеков Б.К., Кукушева А.Б. Планирование эксперимента по очистке выхлопных газов ультразвуком. *Вестник СибАДИ*. 2021;18(1):86–95. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-1-86-95>
21. Shen Q., Zhou F., Wang Y., Tang Sh., Zhang P. Study on the Design of a Water Dispenser for Visually Impaired Families. *Sustainability*. 2022;14(4):2081. <https://doi.org/10.3390/su14042081>
22. Li S., Zeng C., Peng R., Ma Sh. Development of an Automatic Pellet Dispenser for Forelimb Grasping Experiments in Rodents. In: ICBEA '22: Proceedings of the 6th International Conference on Biomedical Engineering and Applications. New York: Association for Computing Machinery; 2022. p. 27–31. <https://doi.org/10.1145/3543081.3543086>
23. Jianjian T., Haitao L., Yuefeng D., Enrong M., Yunyi G., Xinjian L. Simulation Analysis on the Performance of Splitting and Picking Devices of Corn Harvester. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2020;62(3):69–78. <https://doi.org/10.35633/inmateh-62-07>

24. Juraeva M., Kang D.-J. Optimal Combination of Mixing Units Using the Design of Experiments Method. *Micromachines*. 2021;12(8):985. <https://doi.org/10.3390/mi12080985>
25. Jianjian T., Haitao L., Yuefeng D., Enrong M., Junnan Z., Xinjian L. Rapid Design of Maize Ear Harvester Header Based on Knowledge Engineering. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2020;61(2):263–272. <https://doi.org/10.35633/inmateh-61-29>
26. Manz P., Eich T., Grover O. The Power Dependence of the Maximum Achievable H-Mode and (Disruptive) L-Mode Separatrix Density in ASDEX Upgrade. *Nuclear Fusion*. 2023. Article no. 076026. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/acd9db>
27. Park S., Kang S., Yoon H.Ja. Power Factor of One Molecule Thick Films and Length Dependence. *ACS Central Science*. 2019;(5):1975–1982. <https://doi.org/10.1021/acscentsci.9b01042>
28. Parra-Murillo C.A., Santos M.F., Monken C.H., Jorio A. Power Dependence of Klyshko's Stokes-Anti-Stokes Correlation in the Inelastic Scattering of Light. *Preprint*. 2015. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1503.01518>
29. Zhang H.J., Xu C.B., Liu S.X., Jiang H., Liu X., Wang J.X. Parameter Optimization and Experiment of Orchard Double Row Ditching-Fertilizing Machine. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2020;62(3):9–18. <https://doi.org/10.35633/inmateh-62-01>
30. Xue J., Wu P., Su H., Zhang Y., Zhang H. Experimental Research on Comprehensive Performance of Coupled Muffler Based on Split-Stream Rushing Principle. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2020;62(3):29–38. <https://doi.org/10.35633/inmateh-61-03>
31. Ji Z., Zhang Y., Gan M., Fan X., Chen X., Huang X. Importance of Intensive Mixing on Sintering with Fine-Grained Iron Ore Materials: Characterization and Function Mechanism. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020;9(6):14443–14453. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.10.044>
32. Hevko R.B., Tkachenko I.G., Khomyk N.I., Gumeniuk Y.P., Flonts I.V., Gumeniuk O.O. Determination of Technical-and-Economic Indices of Root Crops Conveyer-Separator During their Motion on Curved Path. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2020;61(2):175–182. <https://doi.org/10.35633/inmateh-61-19>
33. Kupreenko A.I., Isaev Kh.M., Kuznetsov Yu.A., Mikhailichenko S.M., Kravchenko I.N., Kalashnikova L.V. Modeling of mobile TMR mixer operation. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2020;61(2):193–198. <https://doi.org/10.35633/inmateh-61-21>

REFERENCES

1. Egoshin V.L., Savvina N.V., Grzhibovsky A.M. Principal Components Analysis and Factor Analysis in R. *West Kazakhstan Medical Journal*. 2020;(1):6–14. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/gfcmwd>
2. Vlasov A.B. [Factor Analysis of the Diagnostic Model of Thermal Imaging Inspection of High-Voltage Bushings]. *Vestnik of MSTU. Scientific journal of Murmansk State Technical University*. 2004;7(3):429–436. (In Russ) Available at: <https://vestnik.mauuniver.ru/show.shtml?art=403> (accessed 25.07.2025).
3. Mazurkin P.M. [Factor Analysis of Taxation Indicators of Siberian Pine Forests of Different Ages]. *Advances in Current Natural Sciences*. 2009;(12):41–48. (In Russ) Available at: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=14065> (accessed 25.07.2025).
4. Bakenova A.A., Kuanysheva D.G., Plotnikova I.V., Redko L.A., Yanushevskaya M.N. Study of the Factors that Have the Greatest Impact on the Quality of the Object Based on the Planning of the Experiment. *Quality and Life*. 2021;(2):25–30. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.34214/2312-5209-2021-30-2-25-30>
5. Gushchin A.V. Experimental Planning Methods and Group Selection with Linear Interaction Characteristics. *Vestnik PrivGUPS*. 2021;(1):97–103. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://clck.ru/3SrJjX> (accessed 15.08.2025).
6. Tyulpinova N.V., Romashenkova A.A. Forecasting the Quality Parameters of Oxygen Cutting by Design of Experiments. *Modern Materials, Equipment and Technologies*. 2020;(3):71–77. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/xghmso>

7. Fomchenkov A.O., Bonadysev K.O. Application of a Full Factorial Experiment in the Analysis of Complex Linear Circuits. *Ustojchivoe razvitie nauki i obrazovaniya*. 2020;(10):157–163. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/jwwvok>
8. Khetsuriani E.D., Khetsuriani T.E., Bondarenko V.L., Larin D.S. Experimental Technologies for Protection of River Water Intakes from Sediment Deposition. *Biosfernaya sovmestimost': chelovek, region, tekhnologii*. 2020;(2):82–92. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/bdsqgk>
9. Rusakova G.G., Lebed N.I., Tronev S.V., Tsybenko A.F. Optimization of Mode Constructive Parameters Automated Drum Dryer. *Izvestia Volgograd State Technical University*. 2020;(1):73–76. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/tzozdv>
10. Rumyantsev M.I., Kolybanov A.N. Second Simplification of Calculation of the Deformation of Rolls and Strip Profile for Rolling in the Four-High Strip Mill with the Experimental Planning. *Kalibrovochnoe byuro*. 2019;(14):11–15. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://passdesign.ru/journal/number14> (accessed 15.08.2025).
11. Maslov G.G., Palapin A.V., Yudina E.M., Tsybulevsky V.V., Lavrentyev V.P. Optimization of Parameters and Operating Modes of the Spring-Tooth Harrow. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2020;(5):117–121. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://orensau.ru/ru/nauka/izvestiya-orenburgskogo-gau> (accessed 17.08.2025).
12. Popov A.A. Algorithms for Constructing Discrete Approximate Q-Optimal Experimental Designs with Active Identification of Regression Models of Multifactor Systems. *Analysis and Data Processing Systems*. 2024;(94):55–68. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.17212/2782-2001-2024-2-55-68>
13. Popov A.A. Algorithms for Constructing Discrete A-Optimal Experiment Designs in Active Identification of Regression Models of Multifactor Systems. *Analysis and Data Processing Systems*. 2022;(2):39–54. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.17212/2782-2001-2024-2-55-68>
14. Khimchenko A.V., Orobinsky V.I., Ostrikov V.V., Grigorev E.A. Design of Experiment for Determine the Dependence of Change in the Alkaline Number of Motor Oil on Operating Factors within One Replacement Period. *Science in the Central Russia*. 2024;(5):94–104. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-5-94-104>
15. Turgunbaev M.S. Statistical Analysis of the Results of Cutting of Dispersed Soil with Stony Inclusion by the Cutting Tool of an Earthmoving Machine. *Nauka, novye tekhnologii i innovacii Kyrgyzstana*. 2023;(5):27–31. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.26104/NNTIK.2023.68.15.006>
16. Chupshev A., Konovalov V., Fomina M. Optimization in Work Modeling of a Mixer. *Journal of Physics*. In: “Virtual Simulation, Prototyping and Industrial Design 2017”: IV International Scientific and Practical Conference. Tambov: Institute of Physics Publishing; 2018. Article no. 012010. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1084/1/012010>
17. Solonshchikov P.N. Justification of the Design and Sizes of the Impeller of the Unit for The Preparation of Liquid Forage Mixtures. *Bulletin of NGIEI*. 2021;(2):17–26. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2021-2117-17-26>
18. Bulatov S.Yu., Pronin A.N. Research Results of the Screw Dispenser of Dry Bulk Feed Components. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2024;25(1):123–133. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.1.123-133>
19. Sokolov P.E., Bazhukov D.M., Solev D.I., Karapuzov V.I. Optimization of Gypsum-Cementpozzolana Binding Agent Composition Through Designing an Experiment. *Engineering Journal of Don*. 2024;(1):290–304. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2024/8940> (accessed 24.08.2025).
20. Kadyrov A.S., Sarsembekov B.K., Kukisheva A.B. Planning an Experiment for Cleaning Exhaust Gases with Ultrasound. *Vestnik SibADI*. 2021;18(1):86–95. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-1-86-95>
21. Shen Q., Zhou F., Wang Y., Tang Sh., Zhang P. Study on the Design of a Water Dispenser for Visually Impaired Families. *Sustainability*. 2022;14(4):2081. <https://doi.org/10.3390/su14042081>
22. Li S., Zeng C., Peng R., Ma Sh. Development of an Automatic Pellet Dispenser for Forelimb Grasping Experiments in Rodents. In: ICBEA '22: Proceedings of the 6th International Conference

- on Biomedical Engineering and Applications. New York: Association for Computing Machinery; 2022. pp. 27–31. <https://doi.org/10.1145/3543081.3543086>
23. Jianjian T., Haitao L., Yuefeng D., Enrong M., Yunyi G., Xinjian L. Simulation Analysis on the Performance of Splitting and Picking Devices of Corn Harvester. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2020;62(3):69–78. <https://doi.org/10.35633/inmateh-62-07>
 24. Juraeva M., Kang D.-J. Optimal Combination of Mixing Units Using the Design of Experiments Method. *Micromachines*. 2021;12(8):985. <https://doi.org/10.3390/mi12080985>
 25. Jianjian T., Haitao L., Yuefeng D., Enrong M., Junnan Z., Xinjian L. Rapid Design of Maize Ear Harvester Header Based on Knowledge Engineering. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2020;61(2):263–272. <https://doi.org/10.35633/inmateh-61-29>
 26. Manz P., Eich T., Grover O. The Power Dependence of the Maximum Achievable H-Mode and (Disruptive) L-Mode Separatrix Density in ASDEX Upgrade. *Nuclear Fusion*. 2023. Article no. 076026. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/acd9db>
 27. Park S., Kang S., Yoon H.Ja. Power Factor of One Molecule Thick Films and Length Dependence. *ACS Central Science*. 2019;(5):1975–1982. <https://doi.org/10.1021/acscentsci.9b01042>
 28. Parra-Murillo C.A., Santos M.F., Monken C.H., Jorio A. Power Dependence of Klyshko's Stokes-Anti-Stokes Correlation in the Inelastic Scattering of Light. *Preprint*. 2015. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1503.01518>
 29. Zhang H.J., Xu C.B., Liu S.X., Jiang H., Liu X., Wang J.X. Parameter Optimization and Experiment of Orchard Double Row Ditching-Fertilizing Machine. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2020;62(3):9–18. <https://doi.org/10.35633/inmateh-62-01>
 30. Xue J., Wu P., Su H., Zhang Y., Zhang H. Experimental Research on Comprehensive Performance of Coupled Muffler Based on Split-Stream Rushing Principle. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2020;62(3):29–38. <https://doi.org/10.35633/inmateh-61-03>
 31. Ji Z., Zhang Y., Gan M., Fan X., Chen X., Huang X. Importance of Intensive Mixing on Sintering with Fine-Grained Iron Ore Materials: Characterization and Function Mechanism. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020;9(6):14443–14453. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.10.044>
 32. Hevko R.B., Tkachenko I.G., Khomyk N.I., Gumeniuk Y.P., Flonts I.V., Gumeniuk O.O. Determination of Technical-and-Economic Indices of Root Crops Conveyer-Separator During their Motion on Curved Path. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2020;61(2):175–182. <https://doi.org/10.35633/inmateh-61-19>
 33. Kupreenko A.I., Isaev Kh.M., Kuznetsov Yu.A., Mikhailichenko S.M., Kravchenko I.N., Kalashnikova L.V. Modeling of Mobile TMR Mixer Operation. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2020;61(2):193–198. <https://doi.org/10.35633/inmateh-61-21>

Об авторах:

Коновалов Владимир Викторович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии машиностроения Пензенского государственного технологического университета, (440039, Российская Федерация, г. Пенза, пр. Байдукова, ул. Гагарина, д. 1а/11), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5011-5354>, Researcher ID: P-7520-2018, Scopus ID: 57193789361, konovarov-penza@rambler.ru

Моисеев Александр Владимирович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой математики и физики Пензенского государственного технологического университета, (440039, Российская Федерация, г. Пенза, пр. Байдукова, ул. Гагарина, д. 1а/11), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9534-2465>, Researcher ID: AAF-8891-2019, Scopus ID: 15731404900, moigus@mail.ru

Зайцев Владимир Юрьевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии машиностроения Пензенского государственного технологического университета, (440039, Российская Федерация, г. Пенза, пр. Байдукова, ул. Гагарина, д. 1а/11), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6230-0856>, Researcher ID: Q-2601-2018, Scopus ID: 57204113621, vruzai@gmail.com

Донцова Марина Владимировна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии машиностроения Пензенского государственного технологического университета

Technologies, machinery and equipment 325

ситета, (440039, Российская Федерация, г. Пенза, пр. Байдукова, ул. Гагарина, д. 1а/11), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2915-0881>, Researcher ID: N-3708-2018, Scopus ID: 57216627822, dontmv@mail.ru

Вклад авторов:

В. В. Коновалов – формулирование замысла идеи исследования, целей и задач; контроль, лидерство и наставничество в процессе планирования и проведения исследования.

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

В. Ю. Зайцев – разработка или проектирование методологии исследования; создание компьютерных моделей.

М. В. Донцова – создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования и полученных данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила в редакцию 21.05.2025; поступила после рецензирования 22.12.2025; принята к публикации 09.02.2026

About the authors:

Vladimir V. Konovalov, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, Penza State Technological University (1a/11 Gagarin St., Baidukova Ave., Penza 440039, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5011-5354>, Researcher ID: P-7520-2018, Scopus ID: 57193789361, konovalov-penza@rambler.ru

Alexander V. Moiseev, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Mathematics and Physics, Penza State Technological University (1a/11 Gagarin St., Baidukova Ave., Penza 440039, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9534-2465>, Researcher ID: AAF-8891-2019, Scopus ID: 15731404900, moigus@mail.ru

Vladimir Yu. Zaitsev, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Mechanical Engineering Technology, Penza State Technological University (1a/11 Gagarin St., Baidukova Ave., Penza 440039, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6230-0856>, Researcher ID: Q-2601-2018, Scopus ID: 57204113621, vluzai@gmail.com

Marina V. Dontsova, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, Penza State Technological University (1a/11 Gagarin St., Baidukova Ave., Penza 440039, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2915-0881>, Researcher ID: N-3708-2018, Scopus ID: 57216627822, dontmv@mail.ru

Authors contribution:

V. V. Konovalov – ideas; formulation or evolution of overarching research goals and aims; oversight and leadership responsibility for the research activity planning and execution, including mentorship external to the core team.

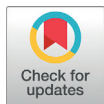
A. V. Moiseev – application of statistical, mathematical, computational, or other formal techniques to analyse or synthesize study data.

V. Yu. Zaitsev – development or design of methodology; creation of computer models.

M. V. Dontsova – preparation, creation and or presentation of the published work, specifically visualization data presentation.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 21.05.2025; revised 22.12.2025; accepted 09.02.2026

**ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ /
TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT**<https://doi.org/10.15507/2658-4123.26362.327-343>EDN: <https://elibrary.ru/rvcuqr>

УДК / UDK 631.354.2:004

*Оригинальная статья / Original article***Структура информационной системы
для решения задачи настройки комбайнов****В. П. Димитров, И. Н. Нурутдинова ,**
Л. В. Борисова, А. Т. Черняев*Донской государственный технический университет,
г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация,
<https://ror.org/00x5je630>* *nurut.inna@yandex.ru**Аннотация*

Введение. Использование ресурсных возможностей, заложенных в конструкцию современных зернокомбайнов, сдерживается влиянием человеческого фактора, в частности, значительной информационной нагрузкой на оператора. Поэтому для повышения эффективности уборочных работ и автоматизации процесса настройки сельскохозяйственной техники актуальным является разработка информационной системы настройки комбайнов.

Цель исследования. Развитие подхода к решению задачи по оптимальной настройке регулируемых параметров рабочих органов комбайна, основанного на внедрении интеллектуальных информационных систем.

Материалы и методы. Объектом исследования выступает программная система поддержки принятия решений для предварительной настройки регулируемых параметров зерноуборочного комбайна. Применены методы системного анализа, экспертного оценивания, нечеткого моделирования и проектирования реляционной базы данных. В качестве программно-аппаратной основы использованы клиент-серверная архитектура и встраиваемая система управления базами данных SQLite.

Результаты исследования. Предложена иерархическая структура задачи предварительной настройки рабочих органов сельскохозяйственной машины, состоящая из слоев и элементов. На ее основе реализована архитектура программной системы. Система может функционировать в двух режимах: эксперта и пользователя. База знаний экспертной системы по настройке базируется на удаленной реляционной системе управления базами данных с возможностью сохранения всех данных локально для работы эксперта и актуальных данных, выбранных экспертами, для работы пользователя. Собрана и проанализирована экспертная информация, на основе которой создана база экспертных знаний. Рассмотрены комбинации значений внешних факторов, для которых приведен вывод конкретных значений регулируемых параметров.

© Димитров В. П., Нурутдинова И. Н., Борисова Л. В., Черняев А. Т., 2026

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. Разработанная информационная система позволяет formalизовать процесс предварительной настройки регулируемых параметров комбайна и снизить зависимость принятия решений от субъективного опыта оператора. Практическая значимость работы состоит в возможности использования системы для поддержки эксперта и пользователя при выборе начальных значений параметров в изменяющихся условиях уборки. Перспективы исследования связаны с расширением базы знаний, учетом большего числа факторов и развитием механизмов автоматической корректировки настроек в реальном времени.

Ключевые слова: зерноуборочный комбайн, предварительная настройка, производственные правила, экспертная база знаний, иерархическая структура задач, клиент-серверная архитектура

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Димитров В.П., Нурутдинова И.Н., Борисова Л.В., Черняев А.Т. Структура информационной системы для решения задачи настройки комбайнов. *Инженерные технологии и системы*. 2026;36(2):327–343. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.26362.327-343>


Structure of the Information System for Solving the Problem of Adjusting Harvesters

V. P. Dimitrov, I. N. Nurutdinova 

L. V. Borisova, A. T. Chernyaev

Don State Technical University,

Rostov-on-Don, Russian Federation, <https://ror.org/00x5je630>

 *nurut.inna@yandex.ru*

Abstract

Introduction. The use of the capabilities of the design of modern grain harvesters is limited by the human factor, in particular, by the significant information load on the operator. To increase the efficiency of harvesting operations and automate the process of adjusting agricultural machinery, it is relevant to develop an information system for adjusting harvesters.

Aim of the Study. The study is aimed at developing an approach to solving the problem of optimal adjustment of adjustable parameters of the combine harvester working bodies through using the introduction of intelligent information systems.

Materials and Methods. The study subject is a decision support software system for preliminary adjustment of grain harvester adjustable parameters. To solve the problem, there were used the methods of system analysis, expert assessment, fuzzy simulation, and relational database design. Client-server architecture and an embedded Database Management System SQLite were used as the hardware and software basis.

Results. There has been proposed a hierarchical structure for the task of preliminary adjusting of agricultural machinery working bodies. This structure consists of layers and elements and is the basis for the software system architecture. The system can operate in two modes: an expert mode and user mode. The expert system knowledge base for adjustment is based on a remote relational Database Management System with the ability to store all data locally for expert work and relevant data selected by experts for user work. There has been collected and analyzed expert information, which is used to create an expert knowledge base. There have been considered various combinations of external factor values, for which a conclusion about specific values for adjustable parameters has been derived.

Discussion and Conclusion. The developed information system allows formalizing the preliminary adjustment process for the harvester adjustable parameters and reducing the dependence of decision-making on the operator subjective experience. The practical importance of the study is in the ability to use the system to support experts and users when selecting initial parameter values in changing conditions of harvesting. Future studies are relevant, because of the necessity of expanding the knowledge base in the area under studying, taking into account a greater number of factors, and developing mechanisms for automatic adjustment of parameters in real time.

Keywords: grain harvester, preliminary adjustment, production rules, expert knowledge base, hierarchical task structure, client-server architecture

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

For citation: Dimitrov V.P., Nurutdinova I.N., Borisova L.V., Chernyaev A.T. Structure of the Information System for Solving the Problem of Adjusting Harvesters. *Engineering Technologies and Systems*. 2026;36(2):327–343. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.26362.327-343>

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение продовольственной безопасности является одной из центральных задач сельского хозяйства. Важное место в ее решении занимает уборка урожая. В первую очередь это касается уборки зерновых и зернобобовых культур. Снижение потерь и повышение качества выполняемых работ достигается за счет непрерывного конструктивного совершенствования зерноуборочных комбайнов¹.

В последние годы широкое применение получили высокопроизводительные комбайны, к которым относятся агрегаты с аксиально-роторным молотильно-сепарирующим устройством, отличающиеся высокой пропускной способностью, меньшим процентом дробления зерна и возможностью работы на более засоренных полях [1–3]. Несмотря на непрерывное совершенствование таких устройств и других агрегатов [2; 4; 5], для полноценного использования конструктивных возможностей техники требуется оптимальная настройка регулируемых параметров комбайна, работающего в различных внешних условиях [3; 6; 7]. Это обусловлено неоднозначностью и нечеткостью информации о внешних факторах, показателях качества уборки, технических характеристиках состояния машины, а также сложными взаимосвязями между этими группами факторов и их изменениями во времени. Установленные на основе экспертных знаний и эмпирических исследований зависимости между указанными факторами образуют огромный массив информации, для использования которой с целью выбора значений регулируемых параметров комбайна требуется создание интеллектуальной информационной системы (ИИС).

Целью исследования является разработка структуры, программных блоков, базы экспертных знаний интеллектуальной информационной системы для обеспечения операторов актуальными данными, необходимыми для оптимальной предварительной настройки регулируемых параметров зернокомбайнов.

Реализация поставленной цели включает следующие задачи: разработка иерархической структуры задач настройки комбайна с учетом иерархии объектов

¹ Липовский М.И., Перекопский А.Н. Зерноуборочный комбайн: из прошлого – к новому поколению. СПб.: ИАЭП; 2015. 313 с.

предметной области; проектирование реляционной базы данных для хранения экспертных знаний в виде продукционных правил; реализация клиент-серверной архитектуры с локальными встраиваемыми базами данных для автономной работы; создание пользовательских интерфейсов для эксперта и оператора комбайна; формирование базы экспертных знаний.

Результаты исследования составляют основу ИИС для помощи оператору в принятии решений по выбору значений регулируемых параметров комбайна. На данный момент разработаны и апробированы самостоятельные блоки ИИС, на которые получены свидетельства о государственной регистрации².

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Различные аспекты проблемы оптимальной настройки рабочих органов зерноуборочного комбайна исследуются на протяжении последних десятилетий. В научной литературе широко представлены подходы к выбору режимов работы и установке таких регулируемых параметров, как частота вращения ротора и вентилятора очистки при уборке различных культур. Большинство существующих решений базируется на моделях, построенных на основе эмпирических данных и экспертных оценок [6–8].

Зарубежные исследователи проанализировали эмпирические зависимости расхода топлива и параметров настройки комбайна в условиях различной влажности и урожайности [9], что наглядно иллюстрирует значительное влияние даже небольших изменений внешних условий на показатели качества уборки. В частности, были описаны основные этапы технологической настройки рабочих органов на примере комбайна роторного типа [10; 11]. В то же время погрешности в настройке параметров приводят к потерям зерна, снижению производительности, повышенному расходу топлива [12], что фактически занижает конструктивные возможности комбайна.

Анализируя современные тенденции в исследуемой области, можно отметить, что с развитием концепции интеллектуального земледелия все большее внимание уделяется автоматизации процесса управления сельскохозяйственной техникой [13]. Концептуальные принципы создания интеллектуальных машин предполагают обязательное внедрение систем поддержки принятия решений. Исследователи из Китая успешно применяют методы нечеткой логики для контроля скорости движения комбайна, очистки и стабилизации нагрузки [14–16]. Интеллектуальные системы технологической настройки на базе нечеткого моделирования продемонстрировали свою эффективность при определении начальных параметров жатвенной части [6].

Несмотря на достигнутые успехи в области математического и нечеткого моделирования, комплексный подход к созданию единой информационной си-

² Папченко А.А., Борисова Л.В., Димитров В.П., Хубиян К.Л., Черняев А.Т. Соответствие значений регулируемых параметров рабочих органов зерноуборочных комбайнов факторам внешней среды: свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2025622075 Российская Федерация. № 2025621650; заявл. 26.04.25; зарег. 16.05.25. <https://elibrary.ru/sgzej>; Папченко А.А., Борисова Л.В., Димитров В.П., Хубиян К.Л., Черняев А.Т. Программа составления таблиц соответствия комбинации входных и выходных значений: свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2025616246 Российская Федерация. № 2025614858; заявл. 11.03.25; зарег. 13.03.2025. <https://www.elibrary.ru/dwqddy>

стемы, способной аккумулировать экспертные знания и оперативно выдавать рекомендации по предварительной настройке параметров комбайнов в полевых условиях, остается недостаточно изученным. До сих пор неизвестно, как оптимально структурировать базы данных и организовать программно-аппаратную архитектуру для автономного функционирования подобных систем на мобильных и встраиваемых устройствах с сохранением сложной иерархии связей между входными (неконтролируемыми факторами среды) и выходными (регулируемыми настройками) параметрами. Существующие программные решения либо требуют постоянного подключения к облачным серверам, либо не предоставляют удобного механизма совместной работы экспертов над формированием и объединением баз продукционных правил.

Следовательно, существует острая необходимость в разработке гибкой архитектуры с использованием легковесных баз данных, которая позволит формализовать, систематизировать и автономно использовать экспертные знания. Направленность данного исследования заключается в обосновании и проектировании структуры информационной программной системы для решения задачи оперативной предварительной настройки роторных зерноуборочных комбайнов, способной функционировать на клиентских устройствах без постоянного доступа к сети и поддерживать систему распределенных экспертных правок.

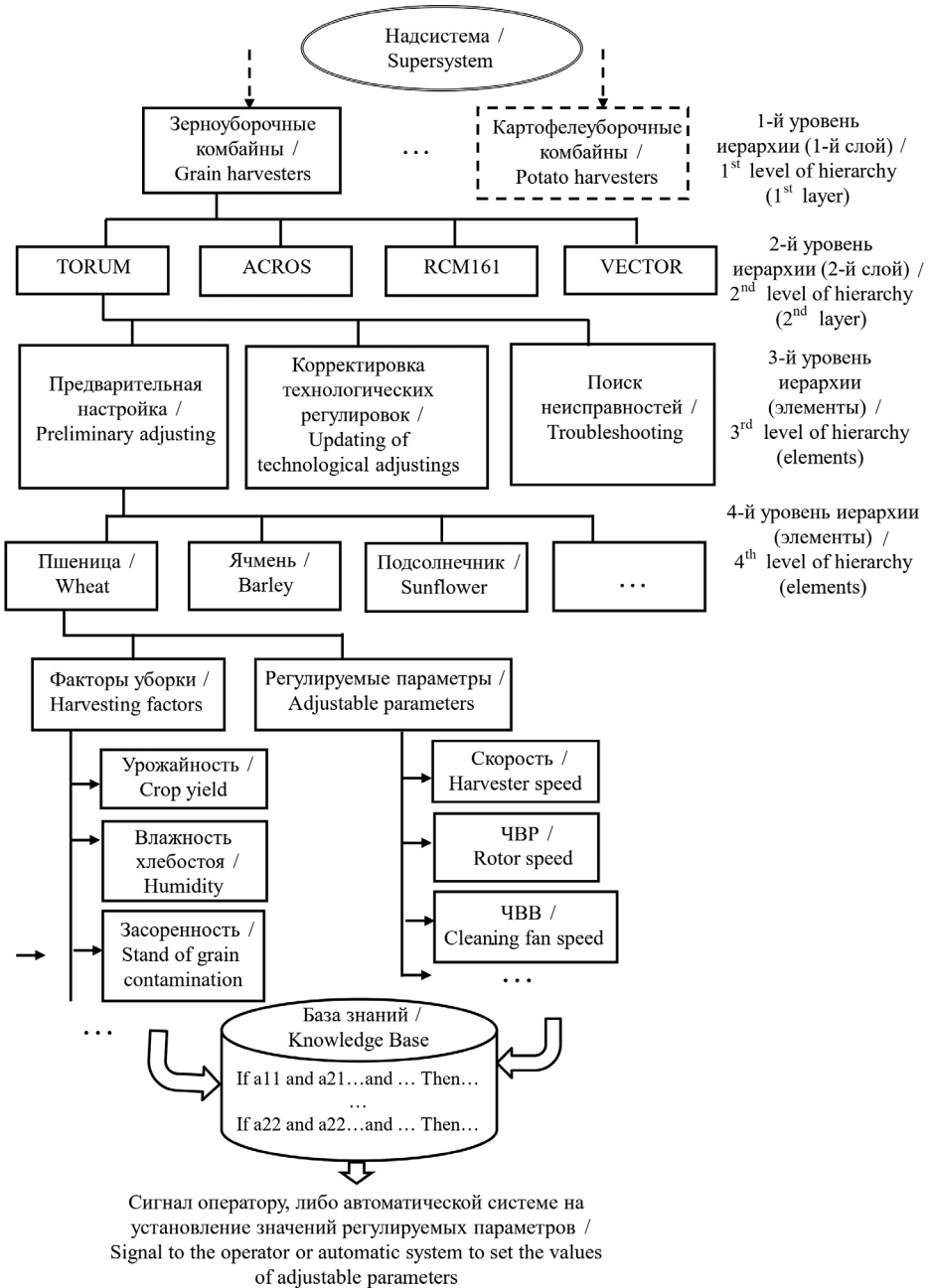
МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования

Объектом исследования является автономная информационная программная система поддержки принятия решений, предназначенная для оперативной предварительной настройки регулируемых параметров рабочих органов зерноуборочного комбайна (в частности, роторного типа, на примере комбайна TORUM) непосредственно в процессе работы. В качестве обобщенной схемы описания данной задачи, актуальной для большинства мобильных сельскохозяйственных уборочных машин, выступает иерархическая структура объектов предметных областей (рис. 1). Данная структура представляет собой древовидный граф, где слой – это узел дерева, который может иметь в потомках другие узлы или листья, а элементы – это листья древовидного графа. Аналогично файловой системе, слои рассматриваются как каталоги, а элементы – как файлы. В данном случае предусмотрено использование нескольких слоев (1 уровень иерархии). Это могут быть уборочные машины, предназначенные для уборки различных культур (зерновые, зернобобовые, картофель и др.). Второй слой рассматривает различные типы зерноуборочных машин (TORUM, ACROS, RSM161 и др.).

Методы, оборудование и процедура исследования

На основе ранее разработанного подхода [17; 18], базирующегося на методах нечеткого моделирования экспертных знаний и лингвистическом подходе, для создания информационной системы применялись методы системного анализа, экспертного оценивания и проектирования реляционных баз данных.



Р и с. 1. Иерархия слоев и элементов системы
F i g. 1. Hierarchy of layers and elements of the system

Источник: рисунки 1–3 составлены авторами статьи в программе Microsoft PowerPoint.
Source: figures 1–3 were compiled by the authors of the article in the program Microsoft PowerPoint.

Для каждого зерноуборочного комбайна характерны типовые задачи, решаемые в практических (полевых) условиях: предварительная настройка машины, корректировка технологических регулировок, поиск неисправностей и др. Следующим уровнем иерархии является наличие элементов для каждого блока предыдущей ступени. В частности, множество культур, для уборки которых используется данная сельскохозяйственная машина. Для каждой культуры характерны собственные элементы, составляющие множества факторов уборки и регулируемых параметров машины. Среди факторов уборки – урожайность, влажность хлебной массы, а среди регулируемых параметров – частота вращения ротора, частота вращения вентилятора очистки и др. (рис. 1).

На основе экспертной информации формируется база знаний экспертной системы, основанная на продукционной модели представления знаний. На основе механизма вывода решений формируются сигналы оператору на установление конкретных значений регулируемых параметров.

Таким образом, целью создания информационной системы для настройки сельскохозяйственных машин является программная реализация рассмотренной иерархической структуры задач технологической регулировки, а также инструментария для создания таких баз знаний экспертами и предоставления данных конечным пользователям.

Формализованные зависимости между входными и выходными параметрами системы представляют собой множество правил, отображающих набор высказываний A_1, A_2, \dots, A_n о состоянии входных факторов в высказывание B о выходном параметре. Правила носят эмпирический характер и имеют вид: «Если A_1 и A_2 и ... и A_n , то B ».

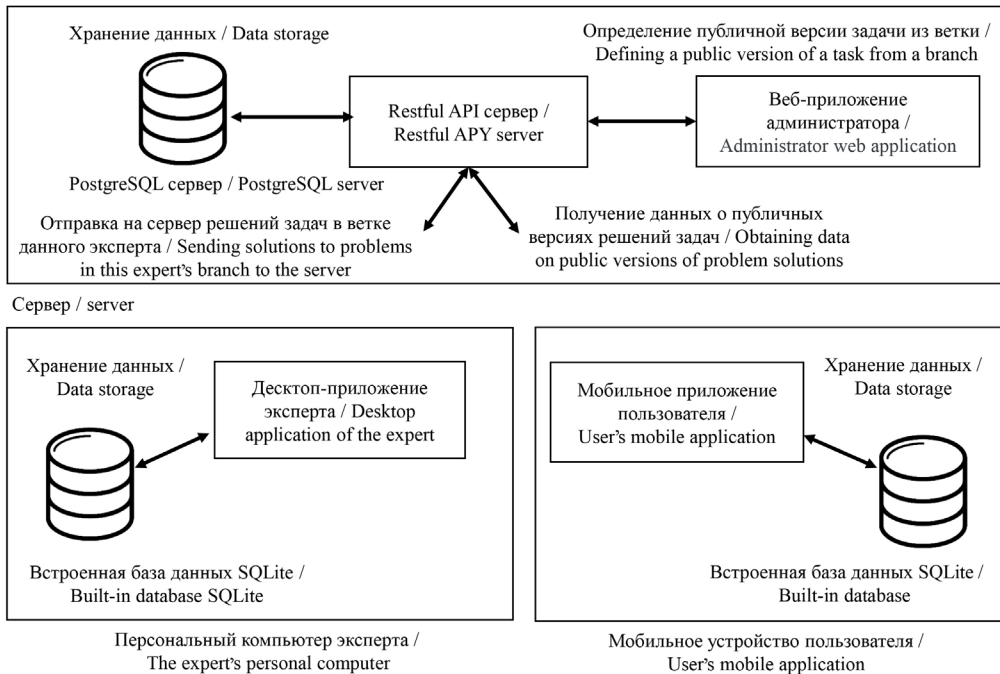
В результате структурной идентификации получается схема решения задачи [18]. При этом данная схема соответствует прямой задаче, которая состоит в определении оптимальных значений регулируемых параметров в зависимости от значений факторов уборки, т. е. входными переменными являются факторы уборки, а выходными – регулируемые параметры комбайна. Отметим, что для второй, обратной, задачи необходимо структурировать взаимосвязи между регулируемыми параметрами и показателями качества работы комбайна, когда входными переменными являются регулируемые параметры, а выходными – показатели качества работы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В процессе наполнения базы знаний информационной системы эксперт должен проанализировать все вероятные сочетания лингвистических оценок, характеризующих входные факторы, и поставить каждой такой комбинации в соответствие наиболее рациональное значение регулируемого параметра комбайна [18].

В целях практической реализации данного подхода была спроектирована распределенная архитектура программного комплекса (рис. 2). Базовым узлом выступает удаленный сервер с поддержкой Restful API для управления централизованной базой данных, а также веб-модуль администратора, служащий для выбора и публикации утвержденных версий задач. Работа специалистов

организована через профильное десктопное приложение, функционал которого включает как непосредственное формирование экспертных решений, так и автоматическое создание локальных резервных копий серверной базы во встраиваемую систему управления базами данных. Для конечного потребителя предусмотрено мобильное приложение: оно обеспечивает ввод фактических значений факторов среды с последующей выдачей рекомендованных настроек из публичной базы, при этом кэшируя утвержденные версии задач в памяти мобильного устройства для обеспечения автономной работы в полевых условиях.



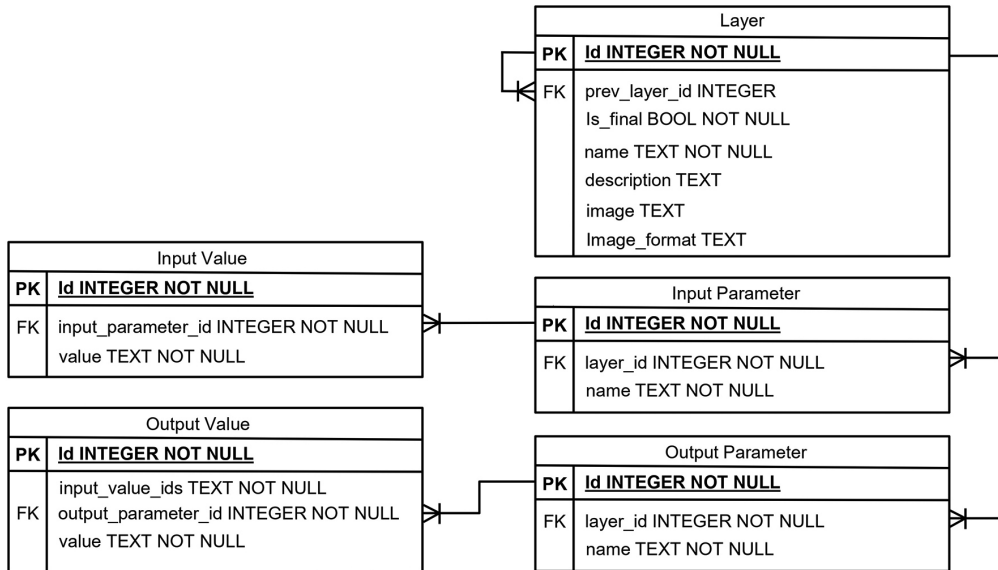
Р и с. 2. Структурная схема программной системы
F i g. 2. Structural schema of the software system

Оптимизация процесса создания и эксплуатации базы знаний требует реализации механизма автоматического формирования комбинаций входных параметров³. В рамках настоящего исследования эта проблема решена через проектирование реляционной базы данных Entity Relationship (ER-модель представлена на рисунке 3), адаптированной для интеграции в специализированное программное обеспечение. Такая архитектура позволяет экспертам систематически формировать данные согласно установленным принципам.

В пользовательском интерфейсе информация представлена в виде электронной таблицы, где входные параметры расположены в заголовках столбцов, а строки

³ Папченко А.А., Борисова Л.В., Димитров В.П., Хубиян К.Л., Черняев А.Т. Программа составления таблиц соответствия комбинации входных и выходных значений.

содержат все возможные комбинации входных значений, сгенерированные методом полного перебора. Такое представление данных напрямую соответствует внутренней структуре базы, что обеспечивает высокую эффективность операций чтения и записи.



Р и с. 3. Схема базы данных без учета таблиц, необходимых для авторизации и системы правок

F i g. 3. Database schema excluding the tables required for authorization and editing system

Формальное описание пользовательского представления выглядит так:

Входные параметры: $IP = \{ip_1, ip_2, \dots, ip_m\}$.

Выходные параметры: $OP = \{op_1, op_2, \dots, op_n\}$.

Входные значения: $IV = \{iv_{1,1}, iv_{1,2}, \dots, iv_{1,k_1}, iv_{2,1}, iv_{2,2}, \dots, iv_{2,k_2}, \dots, iv_{m,1}, iv_{m,2}, \dots, iv_{m,k_m}\}$, где $iv_{i,j}$ – j -е значение входного параметра ip_i .

Выходные значения: $OV = \{ov_{1,1}, ov_{1,2}, \dots, ov_{1,p_1}, ov_{2,1}, ov_{2,2}, \dots, ov_{2,p_2}, \dots, ov_{n,1}, ov_{n,2}, \dots, ov_{n,p_n}\}$, где $ov_{i,j}$ – значение, связанное с выходным параметром op_i , а j обозначает комбинацию входных значений, соответствующую этому выходному значению.

C – множество всех возможных комбинаций входных значений, где каждая комбинация содержит ровно по одному значению от каждого входного параметра: $C = \{\{iv_{1,a_1}, iv_{2,a_2}, \dots, iv_{m,a_m}\} | a_i \in \{1, 2, \dots, k_i\}, \forall i \in \{1, 2, \dots, m\}\}$.

Каждая комбинация $c \in C$ имеет вид: $c = (iv_{1,a_1}, iv_{2,a_2}, \dots, iv_{m,a_m})$, где a_i – индекс выбранного значения для параметра ip_i .

Для любого $c \in C$ существует $ov_{i,j} \in OV$ такое, что $f(c) = ov_{i,j}$, где i соответствует выбранному выходному параметру, а j однозначно определяется индексами входных значений в комбинации c : $\forall op_i \in OP, \forall c \in C, \exists ov_{i,j} \in OV : F(op_i, c) = ov_{i,j}$.

Поскольку над задачей может работать сразу несколько экспертов, необходимо обеспечить удобство их взаимодействия в виде системы правок. Например, при решении задачи моделирования предметной области «Зерноуборочные комбайны» для модели зерноуборочного комбайна «TORUM» и при решении задачи «Предварительной настройки» во время уборки пшеницы один эксперт может увеличить количество рабочих органов зерноуборочного комбайна (выходных параметров), для которых в результате исследования обнаружил наиболее эффективные значения их параметров. Второй эксперт для этой же задачи исследовал некоторые новые параметры среды (входные параметры) и на пересечении всевозможных комбинаций их значений и параметров рабочих органов комбайнов представил соответствующие оптимальные значения уже существовавших в его версии задачи параметров рабочих органов комбайна. В этом случае множества регулируемых параметров отличаются (причем значительно). Для организации подобной работы применили метод контроля версий для набора правил в экспертных системах. Сама концепция системы контроля версий не нова, и наиболее известная ее реализация в сфере разработки программного обеспечения – система Git [19; 20].

Эксперты могут вести параллельно свои версии задачи – ветки, а затем их объединять. Пользователю предоставляется только публичная версия результатов решения задачи, которую определяет администратор системы (уполномоченный экспертом).

При запуске приложения эксперта происходит инициализация встроенной базы данных: для увеличения независимости от подключения к сети Интернет во время непосредственной работы над задачей на устройстве эксперта создается файл встраиваемой базы данных SQLite (при первом входе в программу или в случае потери этого файла), схема которой без учета таблиц, необходимых для работы системы контроля версий, представлена на рисунке 2. Также при инициализации проверяется корректность ее схемы. В случае обнаружения ошибок в схеме базы данных или при невозможности подключиться, приложение создает новый файл с корректной схемой.

После успешной авторизации эксперта приложение обращается к серверу и проверяет (в случае, если было соединение с сетью Интернет), нет ли новых правок в ветках, а также не появились ли в целом новые каталоги задач и задачи. Происходит синхронизация встроенной базы данных на устройстве эксперта с удаленной на сервере. Авторизованному эксперту предоставляется возможность работы с задачами и их директориями. После окончания работы над задачей эксперт может опубликовать свое решение новой добавленной им задачи или правки уже существующей, что сохранит ее также на удаленном сервере и позволит прочим экспертам с ней работать. В таблице приведен пример ввода экспертом взаимосвязей.

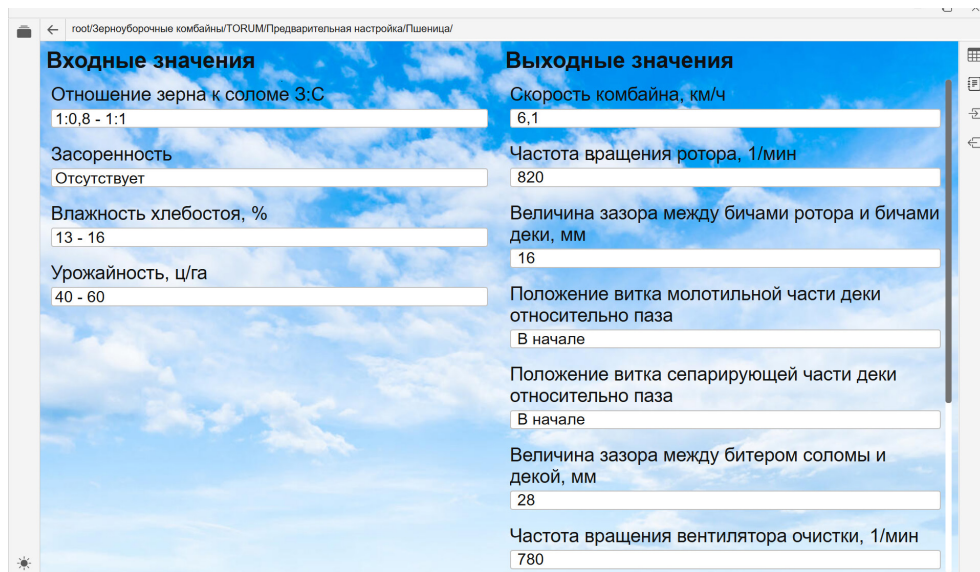
Клиентская часть веб-приложения обладает минимальным функционалом и служит для выбора уполномоченным экспертом актуальной версии (правки) задачи. Именно эту публичную версию задачи и будет скачивать приложение пользователя, остальные правки будут недоступны для его приложения.

Пример ввода экспертом взаимосвязей
Example of expert input of relationships

Входы / Inputs			Выходы / Outputs		
Урожайность, ц/га / Crop yield, hkg/ha	Влажность, % / Humidity, %	Засоренность поля, % / Field contamination, %	Скорость, км/час / Speed, km/h		Частота вращения ротора, мин ⁻¹ / Rotor speed, min ⁻¹
40	14	отсутствует / absent	7,3		800
40	17	средняя / average	6,4		870
...
40	12	большая / big	5,2		830

Пользовательское приложение при открытии проводит процедуру инициализации базы данных, аналогичную таковой у приложения эксперта. Пользователю не нужно знать о ветках и наличии различных версий одной задачи, поэтому в дальнейшем при получении актуальных версий каталогов задач с самими задачами те сущности, в которых есть расхождение между локальными данными на встроенной базе данных и на удаленном сервере, переписываются на актуальную версию.

Далее пользователь выбирает интересующую его задачу из каталогов задач и попадает на экран работы с ней. Здесь он выбирает значения каждого из входных параметров и на выходе получает соответствующие выходные значения (рис. 4)



Р и с. 4. Вид экрана пользователя
F i g. 4. User screen view

Источник: скриншот экрана программы сделан авторами статьи.

Source: screenshot of the program screen was taken by the authors of the article.

В результате проведенного исследования разработана программная система, реализующая подход к решению задачи выбора эффективных начальных значений регулируемых параметров комбайна в зависимости от внешних условий уборки (для конкретной убираемой культуры). Рассмотрено применение основных положений создания современных программных систем. Произведена структуризация системы и формальное описание зависимостей значений параметров машины от значений внешних факторов. Создана база знаний, на которой основывается вывод рекомендуемых начальных значений регулируемых параметров рабочих органов комбайна. На модельном примере представлены результаты работы программной системы.

ОБСУЖДЕНИЕ

Ключевой особенностью разработанной базы данных является поддержка иерархической организации решаемых задач с последующим вычислением выходных значений. Принцип организации данных аналогичен структуре файловой системы: записи таблицы Layer со значением false в поле is_final выполняют роль директорий, тогда как записи с is_final=true аналогичны файлам.

При проектировании реляционной базы данных был выявлен парадоксальный случай, когда строгое следование принципам нормализации привело к ухудшению эксплуатационных характеристик системы. Центральной проблемой стало поле input_value_ids в таблице Output Value, которое хранит идентификаторы связанных записей из таблицы Input Value в виде текстовой строки с разделителями. Такая реализация сознательно нарушает требование атомарности данных, предъявляемое первой нормальной формой, но обеспечивает значительные практические преимущества.

Альтернативный нормализованный подход потребовал бы создания промежуточной таблицы для реализации связи «многие-ко-многим» между таблицами Input Value и Output Value. Однако такое решение привело бы к экспоненциальному росту объема хранимых данных. Каждой записи в Output Value соответствовало бы множество записей в промежуточной таблице – по одной для каждого связанного входного параметра. На практике это означало бы увеличение общего размера базы данных на несколько порядков по сравнению с текущей ненормализованной структурой.

Операции модификации данных в предложенной архитектуре реализуются значительно проще, чем в нормализованном варианте. Например, добавление нового входного значения для существующего параметра требует лишь копирования соответствующих записей таблицы с заменой идентификаторов входных значений, относящихся к данному параметру, на новые. В нормализованной структуре аналогичная операция потребовала бы сложных манипуляций с дополнительными таблицами и существенного усложнения бизнес-логики приложения.

Предложенный подход актуален для широкого спектра уборочной техники и различных культур. Технические сложности могут возникать при большом количестве факторов, которые необходимо учитывать. При высокой мощности множества входных переменных увеличивается количество правил-продукций, что приводит к объемной работе по вводу правил в программу. В этом случае перспективным является использование нейро-нечетких сетей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с поставленной целью в работе развит подход к решению задачи оптимальной настройки регулируемых параметров рабочих органов комбайна, основанный на внедрении интеллектуальных информационных систем. Краткий итог и основной новый вклад исследования заключается в разработке программной системы и гибкой, сознательно ненормализованной архитектуры базы данных, которые позволяют формализовать, систематизировать и автономно использовать экспертные знания. Практическая значимость работы состоит в возможности использования системы для поддержки эксперта и пользователя при выборе начальных значений параметров, что снижает зависимость от субъективного опыта оператора.

Значительная вариабельность факторов уборки как по времени, так и по площади полей может привести к тому, что в процессе работы первоначально установленные значения параметров станут неадекватными изменившимся условиям. Фактически это означает некорректно определенные значения факторов уборки (засоренность, полеглость и др.), которые влекут за собой выбор значений регулируемых параметров, не обеспечивающих поддержание показателей качества уборки в заданных пределах при необходимой производительности комбайна. Так, например, некорректно установленное значение частоты вращения молотильного барабана может приводить к повышенному дроблению зерна. Обнаруженное отклонение показателей качества от допустимых значений требует корректировки значений регулируемых параметров. Разработка механизма корректировки представляет собой самостоятельную задачу и определяет одно из направлений дальнейших исследований. Другим перспективным направлением является расширение автоматизации измерений значений факторов уборки и показателей качества для непосредственной связи с ИИС, что повысит эффективность ее применения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чаплыгин М.Е., Жалнин Э.В. Комплексная оценка эффективности работы современных зерноуборочных комбайнов в условиях южного региона России. *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024;18(2):47–54. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2024-18-2-47-54>
2. Шуляков А.Г., Юдина Е.М., Алаторцев А.Д., Мацко С.М. Молотилки зерноуборочных комбайнов: проблемы и пути их решений. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2021;(1):107–111. <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2021-87-1-107-111>
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/10.1088/1755-1315/949/1/0121094>
4. Липовский М.И. Повышение эффективности обмолота в аксиально-роторном комбайне. *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 2017;84(4):45–50. <https://doi.org/10.17816/0321-4443-66292>
5. Пастухов А.Г., Бахарев Д.Н., Вольвак С.Ф., Бурнукин А.Е., Швыдченко С.А. Концепция обмолота кукурузы роторным молотильно-сепарирующим устройством с воздушной завесой выгрузного окна. *Агроинженерия*. 2024;26(2):4–12. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-2-4-12>
6. Маслов Г.Г., Трубилин Е.И. К обоснованию параметров зерноуборочных комбайнов и их эффективности. *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2016;(2):28–31. URL: <https://www.vimsmit.com/jour/article/view/125> (дата обращения: 15.07.2025).

7. Царев Ю.А., Джигарханов Д.Г. Автоматизация системы настройки технологического процесса зерноуборочного комбайна. *Тракторы и сельхозмашины*. 2009;(12):29–31. URL: <https://journals.eco-vector.com/0321-4443/article/view/68773> (дата обращения: 15.07.2025).
8. 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>
9. 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. URL: <https://www.wfpublisher.com/Abstract/5151> (дата обращения: 15.07.2025).
10. 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>
11. Алдошин Н.В., Бердышев В.Е., Малла Б. Обоснование режимов работы аксиально-роторных зерноуборочных комбайнов на уборке смешанных посевов. *Вестник федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В. П. Горячкина»*. 2019;(3):17–22. <https://doi.org/10.34677/1728-7936-2019-3-17-22>
12. 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. *Ciência e Agrotecnologia*. 2021:e031720. <http://dx.doi.org/10.1590/1413-7054202145031720>
13. 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. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2017-6-9-16>
14. 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. <https://doi.org/10.13031/aea.11299>
15. Zhang K., Cao S., Shen H., Wang H., Xu X., Han T. и др. Wang Fuzzy Control System for Load Stability of Intelligent Combine Harvester. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2018;439(5):052009. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/439/5/052009>
16. 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>
17. Димитров В.П., Борисова Л.В., Тугенгольд А.К., Нурутдинова И.Н. Технологическая настройка машин на основе нечеткой логики. *Вестник Мордовского университета*. 2018;28(2):239–254. <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201802.239-254>
18. 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>
19. German D.M., Adams B., Hassan A.E. Continuously Mining Distributed Version Control Systems: An Empirical Study of How Linux Uses Git. *Empirical Software Engineering*. 2016;21(1):260–299. <https://doi.org/10.1007/s10664-014-9356-2>
20. Лазаренко Е.Н., Дорохина Г.В., Гаркуша Д.А. Анализ систем контроля версий. *Проблемы искусственного интеллекта*. 2023;(2):12–25. URL: [http://paijournal.guiaidn.ru/ru/2023/2\(29\).html](http://paijournal.guiaidn.ru/ru/2023/2(29).html) (дата обращения: 20.07.2025).

REFERENCES

1. Chaplygin M.E., Zhالنin E.V. Comprehensive Evaluation of Modern Combine Harvester Performance in Southern Russia. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024;18(2):47–54. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2024-18-2-47-2>

2. Shulakov A.G., Yudina E.M., Alatorsev A.D., Matsko S.V. Combine Harvester Threshers: Problems and Solutions. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2021;(1):107–111. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2021-87-1-107-111>
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. Lipovskiy M.I. Increasing the Efficiency of Threshing in an Axial Rotary Combine. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2017;84(4):45–50. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.17816/0321-4443-66292>
5. Pastukhov A.G., Bakharev D.N., Volvak S.F., Burnukin A.E., Shvydchenko S.A. Concept of Corn Threshing by a Rotary Threshing-and-Separating Unit with an Air Curtain of the Discharge Port. *Agricultural Engineering*. 2024;26(2):4–12. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-2-4-12>
6. 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.) Available at: <https://www.vimsmit.com/jour/article/view/125> (accessed 15.07.2025).
7. Tsarev Yu.A., Dzhigarkhanov D.G. Automation of Tuning System of Technological Process for a Grain Combine Harvester. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2009;76(12):29–31. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://journals.eco-vector.com/0321-4443/article/view/68773> (accessed 15.07.2025).
8. 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>
9. 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://www.wfpublisher.com/Abstract/5151> (accessed 15.07.2025).
10. 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>
11. Aldoshin N.V., Berdyshev V.Ye., Malla B. Determining Operating Modes of Axial-Rotary Combine Harvesters For Harvesting Mixed Crops. *Vestnik of Federal State Educational Establishment of Higher Professional Education “Moscow State Agroengineering University Named After V.P. Goryachkin”*. 2019;(3):17–22. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.34677/1728-7936-2019-3-17-22>
12. 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. *Ciência e Agrotecnologia*. 2021:e031720. <http://dx.doi.org/10.1590/1413-7054202145031720>
13. 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.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2017-6-9-16>
14. 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. <https://doi.org/10.13031/aea.11299>
15. Zhang K., Cao S., Shen H., Wang H., Xu X., Han T., et al. Wang Fuzzy Control System for Load Stability of Intelligent Combine Harvester. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2018;439(5):052009. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/439/5/052009>
16. 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>

17. Dimitrov V.P., Borisova L.V., Tugengold A.K., Nurutdinova I.N. A Technological Adjustment of Agricultural Machines Based on Fuzzy Logic. *Mordovia University Bulletin*. 2018;28(2):239–254. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201802.239-254>
18. 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. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202501.013-029>
19. German D.M., Adams B., Hassan A.E. Continuously Mining Distributed Version Control Systems: An Empirical Study of How Linux Uses Git. *Empirical Software Engineering*. 2016;21(1):260–299. <https://doi.org/10.1007/s10664-014-9356-2>
20. Lazarenko E.N., Dorokhina G.V., Garkusha D.A. Analysis on Version Control Systems. *Problems of Artificial Intelligence*. 2023;(2):12–25. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: [http://paijournal.guiaidn.ru/ru/2023/2\(29\).html](http://paijournal.guiaidn.ru/ru/2023/2(29).html) (accessed 20.07.2025).

Об авторах:

Димитров Валерий Петрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой управления качеством Донского государственного технического университета (344000, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 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 высшей математики Донского государственного технического университета (344000, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 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 (344000, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6611-4594>, Researcher ID: E-4863-2018, Scopus ID: 7006547874, SPIN-код: 5718-9727, borisovalv09@mail.ru

Черняев Антон Тимофеевич, бакалавр Донского государственного технического университета (344000, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6836-6522>, kaf-qm@donstu.ru

Вклад авторов:

В. П. Димитров – формулирование концепции исследования, интерпретация результатов исследований, подготовка начального варианта текста и выводов.

И. Н. Нурутдинова – обзор литературы, анализ экспертной информации, выбор оптимальных моделей.

Л. В. Борисова – лингвистическое описание предметной области, моделирование нечетких экспертных знаний.

А. Т. Черняев – создание базы нечетких продукционных правил, программирование задачи.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 29.07.2025; поступила после рецензирования 23.01.2026;
принята к публикации 27.02.2026*

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 344000, 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 Higher Mathematics, Don State Technical University (1 Gagarin Sq., Rostov-on-Don 344000, 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 and Business-processes Department, Don State Technical University (1 Gagarin Sq., Rostov-on-Don 344000, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6611-4594>, Researcher ID: E-4863-2018, Scopus ID: 7006547874, SPIN-code: 5718-9727, borisovalv09@mail.ru

Anton T. Chernyaev, Undergraduate Student, Don State Technical University (1 Gagarin Sq., Rostov-on-Don 344000, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6836-6522>, kaf-qm@donstu.ru

Authors contribution:

V. P. Dimitrov – formulating the basic concept of the study, interpreting the study results, preparing the initial version of the text and formulating the conclusions.

I. N. Nurutdinova – literary analysis, analyzing the expert data, selecting optimal models.

L. V. Borisova – linguistic description of the subject area of the study, modeling of fuzzy expert knowledge.



A. T. Chernyaev – creating a fuzzy production rules base, programming the task.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 29.07.2025; revised 23.01.2026; accepted 27.02.2026

**ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ /
ELECTRICAL TECHNOLOGY AND ELECTRICAL EQUIPMENT**<https://doi.org/10.15507/2658-4123.26362.344-366>EDN: <https://elibrary.ru/rzbgghu>

УДК / UDK 621.313.13/.17:634

*Оригинальная статья / Original article***Оценка влияния количества немагнитных вставок статора на величину силы тяги якоря линейного электродвигателя секатора****Г. В. Никитенко, С. Н. Антонов** , **Н. С. Гаркавенко**
*Ставропольский государственный аграрный университет,
г. Ставрополь, Российская Федерация, <https://ror.org/02ne6gz21>
 antonov_serg@mail.ru**Аннотация*

Введение. Садоводство – это одно из передовых направлений сельского хозяйства, которое в последние годы демонстрирует количественный и качественный рост объема производства. Для обеспечения стабильности в долгосрочной перспективе необходима модернизация технических и технологических систем, используемых при детальной обрезке деревьев. В данный момент соотношение ручного и механизированного труда составляет 80 к 20 %. Высокая трудоемкость при работе с ручными или рычажно-приводными секаторами обуславливает неэффективность их использования и низкую производительность оператора. Наиболее актуальным является разработка устройств обрезки с приводом от линейного электродвигателя. **Цель исследования.** Определить влияние количества немагнитных вставок статора и их геометрических размеров на силу тяги якоря.

Материалы и методы. Объект исследования – магнитная система линейного электродвигателя. Определялись конструктивные характеристики магнитной системы, влияющие на основной параметр работы линейного электродвигателя – силы тяги якоря. Исследования проводились с использованием законов электромеханики, теоретических основ электротехники, методов компьютерного моделирования.

Результаты исследования. При компьютерном моделировании магнитной системы изменялась длина немагнитной вставки статора от 8 до 18 мм, а также количество вставок от 1 до 5 шт. Получены зависимости изменения силы тяги, диапазон варьирования скорости при перемещении якоря и его взаимосвязь с количеством и длиной немагнитной вставки. При исследовании немагнитной вставки 8 мм максимальная сила тяги якоря 50 Н достигается при перемещении якоря за 3 мс. При этом для немагнитной вставки 18 мм максимальная сила равна 40 Н при перемещении якоря за 12 мс.

Обсуждение и заключение. Уменьшение длины немагнитных вставок статора, а также увеличение их количества приводит к повышению силы тяги якоря, что обеспечивает возрастание быстродействия, и улучшению качества поверхности

© Никитенко Г. В., Антонов С. Н., Гаркавенко Н. С., 2026

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

среза ветки. Представленные результаты рекомендуется использовать при проектировании линейного электропривода для ручного инструмента. Перспектива исследования предполагает изучение влияния формы немагнитных и магнитных вставок на силу тяги якоря.

Ключевые слова: линейный электродвигатель, магнитная система, сила тяги якоря, садоводство, обрезка деревьев, электрифицированный инструмент

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Никитенко Г.В., Антонов С.Н., Гаркавенко Н.С. Оценка влияния количества немагнитных вставок статора на величину силы тяги якоря линейного электродвигателя секатора. *Инженерные технологии и системы.* 2026;36(2):344–366. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.26362.344-366>

Assessing the Effect of the Number of Stator Non-Magnetic Spacers on Armature Pulling Force of Pruner Linear Motor

G. V. Nikitenko, S. N. Antonov[✉], N. S. Garkavenko

Stavropol State Agrarian University,

Stavropol, Russian Federation, <https://ror.org/02ne6gz21>

[✉] antonov_serg@mail.ru

Abstract

Introduction. Horticulture is one of the leading areas of agriculture, which has been demonstrating the increase in quantity and quality of products in recent years. To ensure long-term stability, it is necessary to modernize the technical and technological systems used for tree pruning. Currently, the ratio of manual and mechanized labor is 80 to 20%. High labor intensity when using manual or lever-driven pruners causes inefficiency of their use and low productivity of the operator. The most relevant is the development of pruning devices driven by a linear electric motor.

Aim of the Study. The study is aimed at determining the effect of the number of non-magnetic stator spacers and their geometric dimensions on the armature pulling force.

Materials and Methods. The subject of the study is the magnetic system of a linear electric motor. There have been determined the design characteristics of the magnetic system affecting the main parameter of the linear electric motor operation – armature pulling force. The study was conducted using the laws of electromechanics, the electrical engineering theoretical fundamentals, and computer modeling methods.

Results. During computer modeling of the magnetic system, the length of the non-magnetic stator spacers changed from 8 to 18 mm and the number of spacers changed from 1 to 5 pcs. There have been found the dependences of the change in pulling force, the range of speed variation during armature movement on the length and number and of the non-magnetic spacers. In examining a non-magnetic spacer of 8 mm, it was found that the maximum armature pulling force of 50 N was achieved in 3 ms and for a non-magnetic spacer of 18 mm, the maximum pulling force is 40 N in 12 ms.

Discussion and Conclusion. Decreasing the length of the non-magnetic stator spacers and increasing their number, leads to increases in the armature pulling force resulting in increased operation speed and improved quality of the branch cut surface. It is recommended to use the presented results for designing a linear electric drive for hand tools. Future studies suggest studying the influence of the shape of non-magnetic and magnetic spacers on the armature pulling force.

Keywords: linear electric motor, magnetic system, armature pulling force, horticulture, tree pruning, electric tool

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

For citation: Nikitenko G.V., Antonov S.N., Garkavenko N.S. Assessing the Effect of the Number of Stator Non-Magnetic Spacers on Armature Pulling Force of Pruner Linear Motor. *Engineering Technologies and Systems*. 2026;36(2):344–366. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.26362.344-366>

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время перед садоводами России стоят задачи, связанные с внедрением передовых технологий выращивания фруктовых деревьев, повышением урожайности, формированием кроны деревьев и кустарников¹. Самыми трудоемкими процессами в садоводстве считаются: уборка плодов, прополка сорных растений и обрезка деревьев. Для выполнения этих работ необходима большая численность персонала. Нехватка специалистов приводит к снижению эффективности производства в сфере выращивания фруктов, росту цен на продукцию садоводства. Дефицит кадров обуславливает интенсивное внедрение прогрессивных технологий выращивания фруктов и повышение конкурентоспособности отечественной продукции.

Для повышения производительности труда работников садов разработано и выпускается несколько видов технологического оборудования. Например, для обрезки крон плодовых деревьев и избавления их от сухих веток и сучьев, а также ограничения роста растений, используются различные секаторы². Наиболее применяемыми инструментами являются: садовые ножницы, секатор, сучкорез, секатор с храповым механизмом, ножницы для фигурной стрижки растений, секатор прививочный и др. Все перечисленные механические секаторы имеют ручной или рычажный привод, что снижает эффективность их использования и приводит к низкой производительности работника.

На замену ручных секаторов приходят инструменты с различными видами приводов. Наиболее широкое распространение получил электрический привод с применением вращательных электромашин, однако он имеет ряд недостатков: высокая цена, наличие передаточного механизма, низкая скорость срабатывания режущего инструмента, что ухудшает качества среза.

По мнению некоторых исследователей, перспективным приводом для ручных инструментов, используемых в садоводческом хозяйстве, считается линейный электропривод. Его использование позволяет быстрее и точнее

¹ Развитие садоводства и питомниководства: сайт [Электронный ресурс]. URL: <https://фнтп.рф/subprogramms/gardening> (дата обращения: 21.06.2025).

² Тавасиев Р.М. Средства малой механизации для плодовых насаждений крестьянских (фермерских) хозяйств: дисс. ... д-ра техн. наук. Владикавказ; 2009. 277 с.; Тавасиев Р.М., Каргаев М.Л., Икаев Д.А. Разработка штангового секатора ветвей и кустарников с электроприводом. В: Перспективы развития АПК в современных условиях: Материалы 8-й Междунар. науч.-практ. конф. Владикавказ: Горский гос. аграрный ун-т; 2019. С. 138–142. <https://elibrary.ru/znstci>; Темиржанов И.О. Разработка и обоснование основных параметров веткорезного агрегата для детальной обрезки плодовых деревьев: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Нальчик; 2000. 24 с.

выполнить обрезку кроны фруктовых деревьев с меньшими затратами физического труда³.

Подбор линейного электродвигателя (ЛЭД) к режущему устройству начинается с разработки его конструкции, в частности, рационализации магнитной системы статора и якоря [1–3]. От конструкции магнитной системы ЛЭД зависит сила тяги, длина хода режущего инструмента и быстродействие срабатывания⁴ [4]. Якорь ЛЭД, соединенный с лезвием секатора, необходим для линейного перемещения и осуществления процесса резания веток. Линейные электродвигатели преобразуют потребляемую энергию от источника питания в возвратно-поступательное движение якоря без использования передаточных элементов, поэтому их характеристики должны соответствовать параметрам режущего инструмента. Рационализация магнитной системы статора и якоря электродвигателя дает возможность повысить эффективность его работы, увеличить усилие на вторичном элементе и магнитный КПД.

Целью исследования является оценка влияния количества немагнитных вставок и их размеров в магнитопроводе статора линейного электродвигателя на силу тяги якоря. Для достижения поставленной цели необходимо решить задачу по рационализации конструкции магнитной системы: длина немагнитной вставки статора, количество немагнитных вставок статора.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Для обрезки деревьев в садоводческих хозяйствах используют инструменты с пневматическим, гидравлическим и электрическим приводами. Ручной инструмент состоит из привода, передаточного устройства, рабочего органа и системы управления. Основным элементом конструкций секаторов является приводное устройство. От вида привода зависит производительность работы секатора, длительность выполняемых технологических операций по обрезке и надежность устройства в процессе его эксплуатации.

В начале развития ручного инструмента для фруктовых садов выпускались секаторы, пилы и ножницы с пневмоприводом. Эти устройства не нашли широкого применения в садоводческих хозяйствах потому, что разработчики не смогли создать легкий, компактный, надежный и дешевый инструмент. Предлагаемые производителями пневмоинструменты, например, для обрезки деревьев до сих пор имеют низкий коэффициент полезного действия – 7–16 % [5].

Пневматический инструмент требует наличия компрессорной установки, воздухопроводной сети или съемных баков со сжатым воздухом, у него ограничена маневренность, и его корпус сильно охлаждается от сжатого воздуха, поэтому работнику необходима защита – перчатки. Из-за множества подвижных

³ Антонов С.Н. Возможности использования линейных электродвигателей в ручных электрифицированных инструментах для промышленного садоводства. В: Состояние и инновации технического сервиса конструкций, машин и оборудования: Материалы XVI междунар. науч.-практ. конф., посвященной 80-ти -летию Инженерного института. Новосибирск: ИЦ НГАУ «Золотой колос»; 2024. С. 340–343. <https://elibrary.ru/ivpunu>

⁴ Каргин В.А. Повышение эффективности технических средств для процессов и технологий АПК использованием машин с линейным электромагнитным приводом: дисс. ... д-ра техн. наук. Саратов; 2020. 375 с.

элементов конструкции поршневые компрессоры создают большой шум, появляется отдача, вибрация инструмента и утечка воздуха, что негативно сказывается на качестве обрезки деревьев и состоянии здоровья обрезчика [5].

Инструменты с использованием гидравлического привода имеют силовую установку, которая состоит из гидроцилиндра, гидромагистральной и гидрокомпенсаторов. Перечисленный набор элементов гидропривода существенно снижает надежность при эксплуатации инструментов, усложняет конструкцию устройств для обрезки деревьев. Также они обладают низким КПД – 50–75 %. Кроме того, наличие гидролиний, подающих поток гидравлической жидкости к инструменту, ухудшает ремонтпригодность в полевых условиях и понижает эффективность действий обрезчика из-за ограничения радиуса работы [5].

В настоящее время наиболее перспективным для ручного электрифицированного инструмента считается электрический привод, обладающий высоким КПД и надежностью. Электрифицированные инструменты имеют ряд преимуществ перед ручными орудиями и агрегатами, работающими от пневмо- и гидроприводов. Они позволяют выполнять обрезку быстрее и точнее, с меньшим физическим усилием и затратами времени. Электрические приводы для ручного инструмента имеют доказанную эффективность, но при этом у них есть ряд недостатков [6–8].

Еще недавно широкому использованию электроприводов в ручных инструментах препятствовало отсутствие эффективных источников питания – аккумуляторных батарей. В качестве источников энергии применялись свинцовые аккумуляторы, которые имели большие габариты, вес и сложности в обслуживании. Появление никель-кадмиевых и литий-ионных батарей позволили вывести проектирование ручного электрифицированного инструмента для обрезки деревьев в садах на новый уровень развития, что позволило создавать инструменты, адаптированные для разных задач⁵.

Некоторые научные подходы, которые применялись на начальных этапах проектирования ручного электрифицированного инструмента, привели к тому, что российскими учеными предпринимались эксперименты по созданию устройств обрезки и источников энергии с использованием мобильной техники.

Были предприняты попытки по созданию измельчителя стволов деревьев, веткорезного агрегата и садовой механизированной пилы с питанием от генератора, приводимого в движение от вала отбора мощности трактора⁶. Электропитание ручного инструмента осуществлялось от источников переменного тока напряжением 220 В и частотой питающего тока 50–200 Гц⁷. Предложенная система электропитания ручного инструмента была малоэффективной, так как существенно удорожала конструкцию и ухудшала массогабаритные

⁵ Оськина А.С. Параметры и режимы асинхронных генераторов для питания электрифицированных инструментов, электротехнологических установок в садах и виноградниках: дисс. ... канд. техн. наук. Краснодар; 2007. 138 с.

⁶ Тавасиев Р.М. Средства малой механизации для плодовых насаждений крестьянских (фермерских) хозяйств; Темиржанов И.О. Разработка и обоснование основных параметров веткорезного агрегата для детальной обрезки плодовых деревьев.

⁷ Оськина А.С. Параметры и режимы асинхронных генераторов для питания электрифицированных инструментов, электротехнологических установок в садах и виноградниках.

показатели передвижных электростанций из-за громоздких электродвигателей, систем управления и коммутации, а также требовала наличия дополнительных устройств для преобразования частоты.

В последнее время при разработке ручного электрифицированного инструмента наметилась тенденция по использованию машин постоянного тока в качестве элементов приводящих устройств, что дает определенные преимущества перед другими видами приводов. Однако их использование предполагает наличие механического преобразователя, который превращает вращательное движение в возвратно-поступательное⁸ [9]. В результате снижается надежность и суммарный КПД инструмента, ухудшаются массогабаритные показатели.

Ручному инструменту с машинами постоянного тока присуща высокая вибрация, большой вес и нагрев поверхностей, что накладывает определенные требования к режиму эксплуатации и времени работы оператора для снижения вредного воздействия на организм человека. Использование такого инструмента может вызвать профессиональные заболевания – вибрационную болезнь, сосудистые нарушения и разрушение скелетно-мышечной системы.

Для облегчения труда работников садоводческих хозяйств, повышения их производительности и сохранения здоровья возникла необходимость в разработке принципиально нового электрического привода для ручного инструмента, который частично позволит устранить недостатки вращательного электропривода за счет применения современных магнитных материалов, 3D-печати для изготовления элементов конструкции электрических двигателей, усовершенствованных систем управления, форсированных источников питания и отказа от передаточных устройств.

В настоящее время разработаны ручные электрифицированные инструменты: секатор, пила и стряхиватель плодов и ягод для садоводческих хозяйств на основе импульсного линейного электропривода [10–12]. Широкому производству и внедрению рассмотренных устройств препятствует отсутствие глубоких научных исследований использования новейших магнитных материалов и применения для моделирования современных компьютерных программ [13].

Для правильного выбора линейного электропривода к ручному инструменту необходимо знать усилие, требуемое для среза ветки. Это усилие зависит от физико-механических свойств и диаметра срезаемых веток, а также сорта плодового дерева. Учитывая это, необходимо обосновать характеристики ЛЭД. Например, величину активного сопротивления намагничивающей катушки, количество витков обмоточного провода, взаимозависимость силы тяги якоря в функции размеров магнитных и немагнитных элементов конструкции статора и якоря, значение силы тяги в момент трогания вторичного элемента, изменение скорости якоря в зависимости от вида источника питания и др.⁹ [14–16].

Быстрое получение необходимых результатов при расчетах возможно в результате применения современного компьютерного оборудования и программного

⁸ Антонов С.Н. Возможности использования линейных электродвигателей в ручных электрифицированных инструментах для промышленного садоводства.

⁹ Усанов К.М. Совершенствование технических средств и технологий АПК системами с электромагнитными импульсными машинами: дисс. ... д-ра техн. наук. Саратов; 2008. 433 с.

обеспечения [17]. Поэтому использование компьютерного моделирования для исследования технических характеристик линейных электродвигателей является актуальной задачей по нескольким причинам [18–20].

Автоматизированное проектирование позволяет прогнозировать и получать требуемые характеристики двигателей в различных режимах работы, например, в зависимости от вида применяемого материала и размеров магнитопровода электродвигателя, плотности тока в намагничивающей катушке, количества витков обмотки, площади и коэффициента заполнения обмоточного окна, вида намотки провода и др. Машинное проектирование дает возможность сократить время расчетов и визуально воспроизводить с высокой точностью сложные статические и динамические процессы, протекающие в линейных электродвигателях в виде двумерных графических зависимостей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На рабочие характеристики импульсного линейного двигателя влияет множество различных параметров [21; 22]. В случае цилиндрического электродвигателя это – геометрические размеры элементов конструкции [23], обмоточные данные, расположение деталей и материалы, из которых они изготовлены, разновидности источников питания¹⁰ [24–26]. Для оценки влияния указанных параметров на технические характеристики линейного электропривода разрабатывается математическая модель, которая описывает исследуемые физические процессы с определенными допущениями. Анализ одного или нескольких режимов работы при неизменных размерах всех элементов конструкции и обмоточных данных выполняется с целью определения технической возможности совместного использования с нагрузочной машиной или инструментом.

Объект исследования

Рассмотрены параметры линейных электродвигателей: активное сопротивление намагничивающей катушки, элементы конструкционного характера. Размеры деталей и тип материалов, из которых изготовлены статор и якорь, влияние на силовые характеристики привода и его быстродействие.

Методы, оборудование и процедура исследования

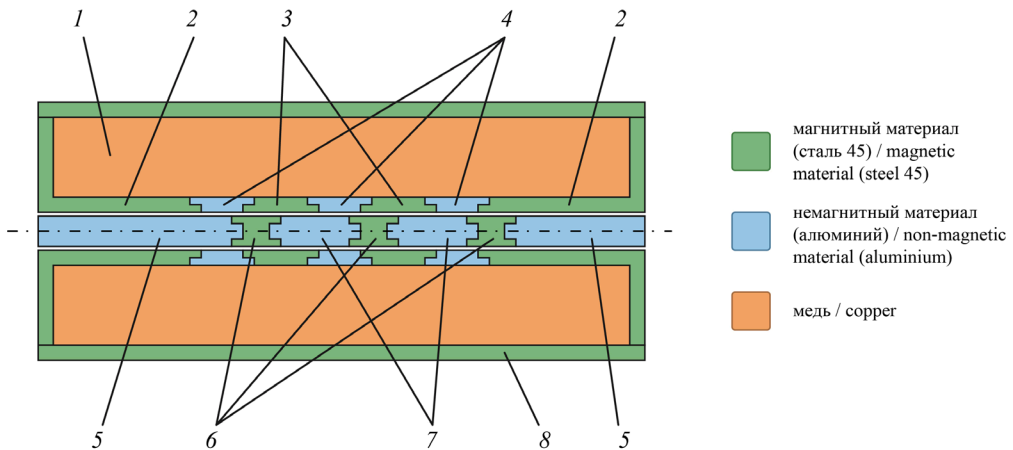
Математическое и компьютерное моделирование начинали с чертежного изображения устройства с точным соотношением его размеров. На рисунке 1 показан фронтальный разрез линейного электродвигателя с выделенными разным цветом зонами, которые соответствуют разным магнитным свойствам материалов.

Корпус линейного электродвигателя δ представляет собой тонкостенный стальной цилиндр из магнитного материала. Он защищает намагничивающую катушку l от внешних механических воздействий и обеспечивает замыкание магнитного потока с торцевых частей статора. Намагничивающая катушка l в виде многослойной винтоспиральной обмотки из медного изолированного провода предназначена для протекания тока и создания магнитного поля. Торцевые части

¹⁰ Кочетков В.П., Беспалов В.Я., Глушкин Е.Я., Котеленец Н.Ф., Подборский Э.Н. Основы электромеханики: учеб. пособие. Саратов: Ай Пи Эр Медиа; 2018. 639 с. <https://elibrary.ru/ymksnv>; Атанов И.В. Линейный управляющий электродвигатель для привода стригальной машинки: дисс. ... канд. техн. наук. Ставрополь; 2000. 206 с.

статора 2 необходимы для прохождения магнитного потока. В целях снижения магнитного сопротивления они изготовлены из ферромагнитного материала. В качестве элементов магнитопровода статора выступают: магнитные втулки статора 3 для прохождения магнитного потока; немагнитные вставки статора 4 для создания искусственного разрыва в магнитопроводе статора. Торцевые части якоря 5 – элементы магнитопровода якоря, которые улучшают замыкание магнитного потока непосредственно на магнитные вставки якоря. Для прохождения магнитного потока, пересекающего воздушный рабочий зазор между статором и якорем, из ферромагнитного материала изготовлены магнитные кольца якоря 6. Кроме этого, для разделения магнитных колец якоря используются немагнитные вставки 7.

Принцип работы двигателя заключается в том, что в магнитопроводе статора создаются разрывы, в которые вставляются цилиндрические немагнитные элементы с большим магнитным сопротивлением, тем самым заставляя магнитный поток статора переходить через рабочий воздушный зазор к магнитопроводу якоря, создавая тяговое усилие. Магнитные кольца якоря 6 расположены со смещением относительно немагнитных вставок статора 4. При подаче напряжения на намагничивающую катушку 1, магнитные кольца якоря 6 шунтируют немагнитные вставки статора 4. При этом создается псевдозамкнутый магнитопровод линейного двигателя.



Р и с. 1. Фронтальный разрез линейного электродвигателя:

1 – намагничивающая катушка; 2 – торцевые части статора; 3 – магнитные втулки статора;
4 – немагнитные вставки статора; 5 – торцевые части якоря; 6 – магнитные кольца якоря;
7 – немагнитные вставки якоря; 8 – корпус

F i g. 1. Front section of linear electrical motor:

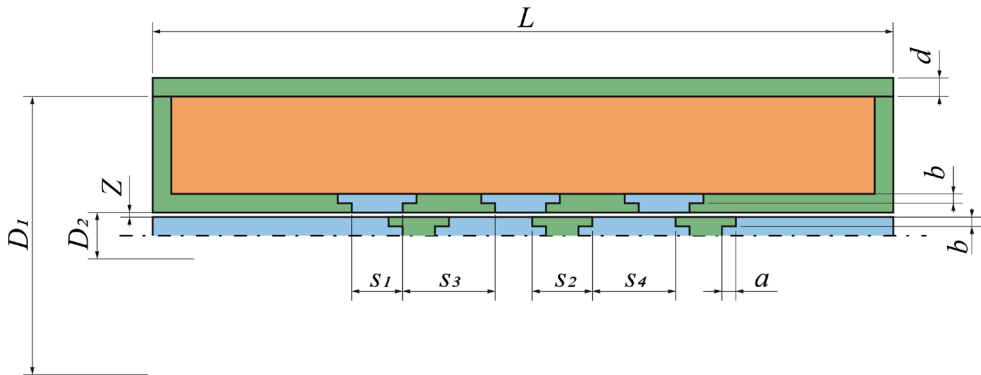
1 – magnetizing coil; 2 – end parts of a stator; 3 – magnetic spacers of a stator;
4 – non-magnetic spacers of stator; 5 – armature end parts; 6 – armature magnetic rings;
7 – non-magnetic spacers of a mover; 8 – case

Источник: рисунки 1, 2, 4, 5, 9 составлены авторами статьи.

Source: figures 1, 2, 4, 5, 9 were made by the authors of the article.

Конструкцию линейного электродвигателя (рис. 2) смоделировали с учетом потенциальной возможности установки в ручной электрифицированный инструмент, поэтому размеры и вес были минимальными, а усилие и ход якоря максимальными.

В связи с этим, общая длина L была принята 160 мм, а внешний диаметр без корпуса $D_1 = 60$ мм. Толщина корпуса и металла статора $d = 4$ мм. На резьбовые части заложено $a = 3$ мм, а в толщину они составляли половину толщины металла $b = d/2 = 2$ мм. Длины немагнитной вставки статора (НС) и магнитного кольца якоря (МЯ) связаны соотношением $S_2 = S_1 + p$, где S_1 – длина НС, S_2 – длина МЯ, p – величина, заложенная на перекрытие магнитного кольца якоря немагнитной вставкой статора в целях избегания дребезга и равная 3 мм. Длины магнитной втулки статора (МС) и немагнитной вставки якоря (НЯ) связаны соотношением $S_4 = S_3 - p$, где S_3 – длина МС, S_4 – длина НЯ. Непосредственную длину НС и МС определяли во время эксперимента. Внутренний диаметр статора $D_2 = 10$ мм, а величина воздушного зазора $Z = 0,3$ мм.



Р и с. 2. Размеры деталей, элементов и частей исследуемого линейного электродвигателя
 F i g. 2. Dimensions of details, elements and parts of linear electrical motor

В качестве материалов, из которых изготовлен электродвигатель, были использованы:

- сталь 45 для элементов магнитопровода статора и якоря (корпус, торцевые части статора, втулки и кольца);
- алюминий для деталей, которые должны создавать большое магнитное сопротивление (немагнитные вставки статора и якоря, торцевые части якоря);
- медный изолированный провод для намагничивавшей катушки.

Для питания намагничивающей катушки линейного электродвигателя выбрали источник постоянного тока с выходным напряжением 20 В. Согласно технологическому процессу, электродвигатель работал в повторно-кратковременном режиме. Температура всех частей конструкции под нагрузкой не достигала установившегося значения для выбранного класса изоляции обмотки. Выбранный режим работы позволил увеличить плотность тока до 8 А/мм^2 , что существенно

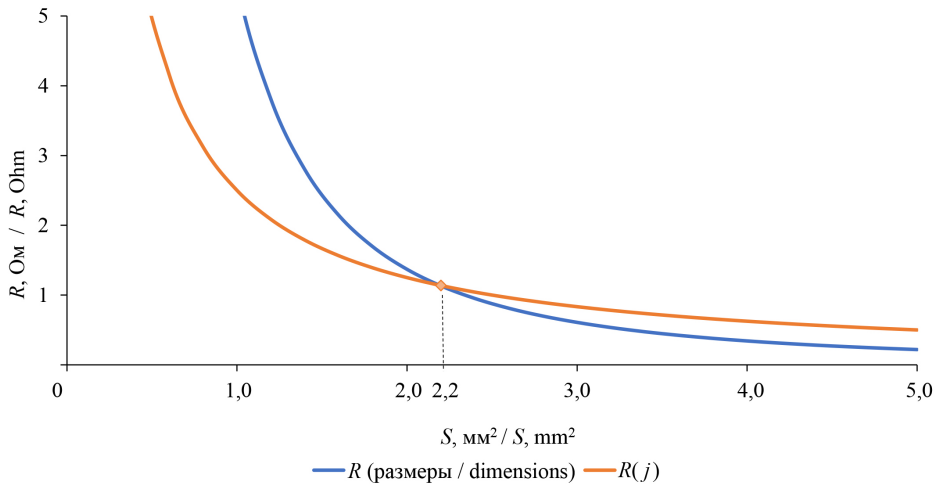
повысило удельные характеристики линейного двигателя – отношение мощности к единице объема.

Математическое моделирование электродвигателя начинали с расчета активного сопротивления намагничивающей катушки с учетом изменяющихся геометрических размеров элементов конструкции, напряжения источника питания, сечения обмоточного провода и плотности тока. Расчет осуществляли по двум уравнениям.

$$\begin{cases} R = \frac{\rho \varepsilon \pi A (D_1^2 - D_4^2)}{4S^2} \\ R = \frac{U}{Sj} \end{cases}, \quad (1)$$

где R – активное сопротивление намагничивающей катушки, Ом; ρ – удельное сопротивление медного провода, Ом·мм; ε – коэффициент заполнения паза; A – длина паза, вычисляемая по формуле $A = L - 2d$, мм; D_1 – внешний диаметр двигателя без корпуса, мм; D_4 – диаметр дна паза, вычисляется по формуле $D_4 = D_2 + 2d$, мм; S – площадь поперечного сечения провода, мм²; U – напряжение, В; j – плотность тока, А/мм².

По результатам расчета были построены графические зависимости, представленные на рисунке 3.



Р и с. 3. Изменение активного сопротивления намагничивающей катушки в функции поперечного сечения провода обмотки

F i g. 3. Change in the active resistance of the magnetizing coil as a function of the cross-section of the winding wire

Источник: график построен авторами статьи при выборе сечения и сопротивления обмоточного провода по формуле (1).

Source: the graph was constructed by the authors of the article when selecting the cross-section and resistance of the winding wire according to formula (1).

По результатам расчета установлено, что значениями, удовлетворяющими обоим уравнениям, являются координаты точки пересечения графиков (рис. 3). Как видно результат по оси абсцисс, который соответствует поперечному сечению провода, составляет 2,19, значение по оси ординат, которое соответствует активному сопротивлению катушки – 1,14. В таком случае $R = 1,14 \text{ Ом}$, $S = 2,19 \text{ мм}^2$.

Очевидно, что намагничивающая катушка, намотанная круглым проводом, не может полностью заполнить паз, в который она укладывается. Поэтому при расчетах учитывали коэффициент заполнения паза ε , который может принимать значение в диапазоне от 0 до 1. Было выбрано значение 0,8.

Так как катушка заполняла не всю площадь окна паза, общую площадь поперечного сечения меди в окне паза с достаточной точностью определили по формуле (2):

$$S_M = \varepsilon P, \quad (2)$$

где S_M – общая площадь поперечного сечения меди в окне паза, мм^2 ; P – площадь окна паза, мм^2 .

Применительно к данной конструкции, обозначая стороны окна паза за A и B , получили формулу (3):

$$S_M = \varepsilon AB, \quad (3)$$

где A – длина паза, мм ; B – ширина паза, мм .

Поскольку катушка намотана круглым проводом одного диаметра, то справедливо сказать, что:

$$S_M = nS,$$

где n – количество витков в катушке.

В таком случае:

$$n = \frac{S_M}{S}.$$

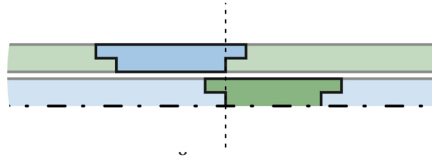
Подставляя ранее указанное уравнение общей площади меди (3) и принимая коэффициент заполнения $\varepsilon = 0,8$, получили:

$$n = \frac{\varepsilon AB}{S} = \frac{0,8 \cdot 152 \cdot 21}{2,19} = 1\,166,02.$$

Принятое для расчетов количество витков катушки – 1 166.

С целью определения степени влияния размеров немагнитных вставок статора на суммарную проводимость магнитопровода линейного электродвигателя и его рабочие характеристики, например, развиваемое тяговое усилие якоря, необходимо выполнить компьютерное моделирование в соответствии с расположением немагнитной вставки статора по отношению к ферромагнитному кольцу якоря (рис. 4).

Для простоты расчета и анализа результатов была использована конструкция электродвигателя с одной НС и одним МЯ. Длина НС принималась в диапазоне от 8 до 18 мм с шагом в 1 мм, с 8 по 12 мм и шагом в 2 мм, с 12 по 18 мм. Длина МЯ для всех случаев вычислялась по формуле $S_2 = S_1 + p$.

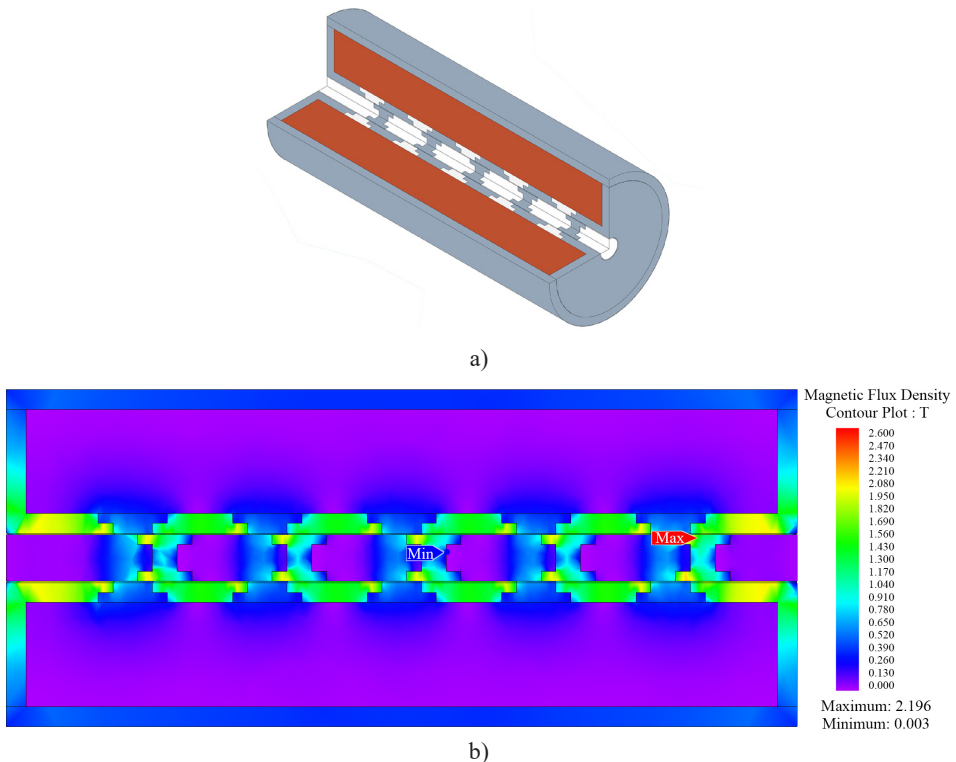


Р и с. 4. Расположение немагнитной вставки статора и магнитного кольца якоря относительно друг друга
 F i g. 4. The location of the non-magnetic spacers and magnetic ring of the armature relative to each other

Немагнитная вставка статора расположена между ферромагнитными втулками магнитопровода статора ровно в середине. Магнитное кольцо якоря установлено со смещением относительно немагнитной вставки статора таким образом, что внутренние торцевые части элементов находятся в одной плоскости (рис. 4).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате выполнения компьютерного моделирования ЛЭД разработаны 3D-модели (рис. 5 а) и произведен расчет магнитных полей (рис. 5 б).



Р и с. 5. Компьютерное моделирование магнитной системы линейного электродвигателя:
 а) 3D-модель ЛЭД; б) картина распределения магнитной индукции в элементах ЛЭД

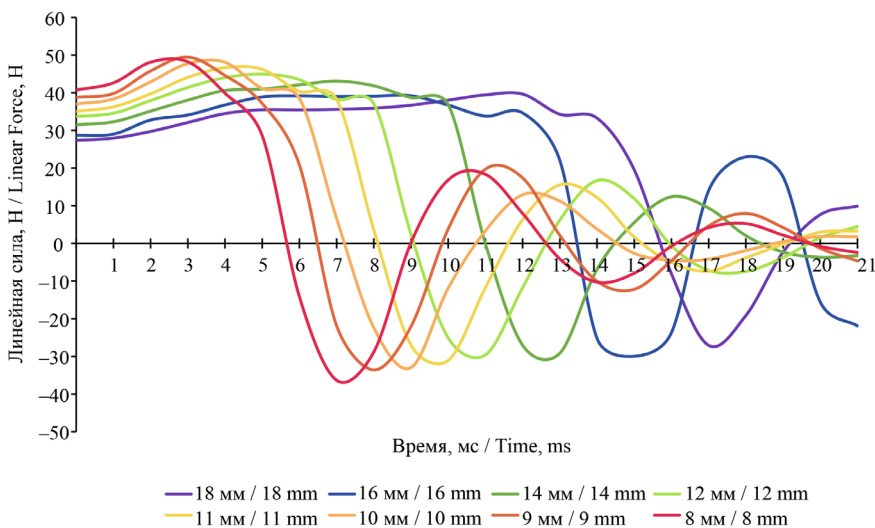
F i g. 5. Computer smodelingof the magnetic system of a linear electric motor:
 а) 3D-model of linear electric motor; б) visual representation of the distribution of magnetic flux density in elements of linear electric motor

Из рисунка 5 видно, что линейный электродвигатель имеет немагнитные и магнитные вставки на статоре и в якоре (рис. 5 а), сочетание которых способствует их магнитному насыщению (рис. 5 б), необходимому для появления силы тяги якоря.

Результаты автоматизированного расчета приведены в виде графиков, связывающих между собой силу тяги, развиваемую электродвигателем, и время движения якоря (рис. 6) в зависимости от длины немагнитной вставки статора.

Для каждого момента времени от 0 до 21 мс с интервалом в 1 мс была рассчитана векторная сумма силы тяги, действующая на якорь.

Поскольку эта сила является векторной величиной, то по оси ординат отложены как положительные, так и отрицательные значения, где положительные указывают на перемещение в сторону начального перемещения, а отрицательные – в противоположную.



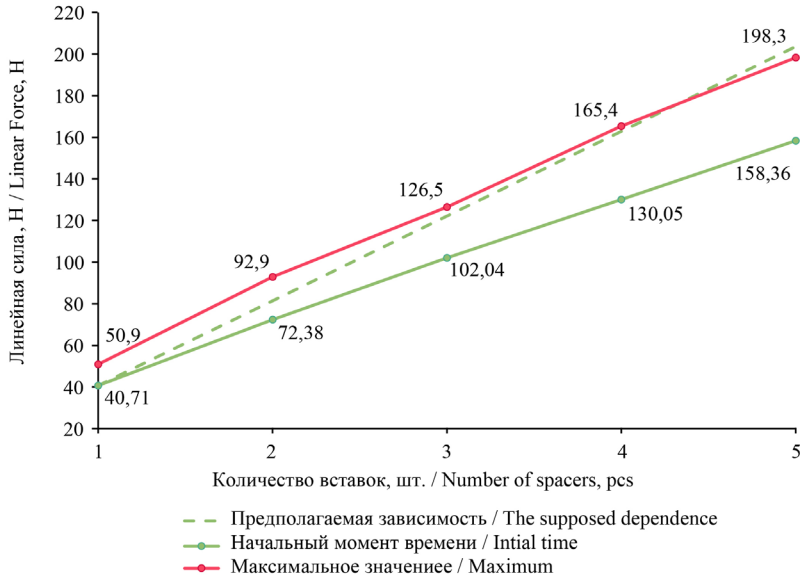
Р и с. 6. Изменение силы тяги во времени в зависимости от длины немагнитной вставки статора
 F i g. 6. Change in pulling force over time depending on the length of the non-magnetic stator spacer

Источник: графики для рисунков 6–8, 10, 11 построены авторами статьи по результатам расчета различных конструкций линейного электродвигателя в программе JMAG.

Source: figures 6–8, 10, 11 were constructed by the authors of the article based on the results of calculations of various designs of a linear electric motor in the program JMAG.

Графическое представление результатов для немагнитной вставки статора размером 9 мм представлено на рисунке 7. После момента пуска в течение 3 мс значение силы возрастает, прежде чем развернуться и пересечь ось абсцисс на 6,5 мс, что соответствует положению равновесия, когда НС и МЯ находятся симметрично относительно друг друга.

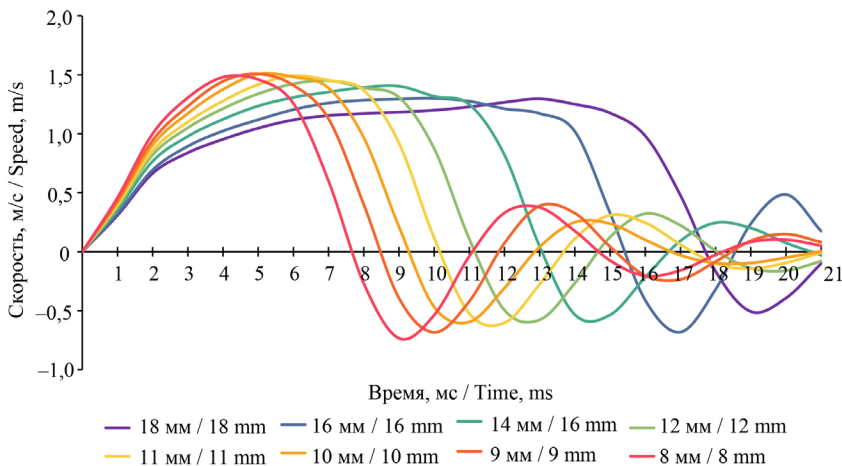
Присутствие смены знака силы тяги связано с тем, что за время перемещения якоря до равновесного положения он успевает достичь такой скорости, что по инерции пролетает чуть дальше, пока сила тяги, направленная уже в обратную сторону, не вернет его снова в равновесное положение. Эти колебания будут продолжаться некоторое время, пока, в конечном итоге, не затухнут.



Р и с. 7. Значения силы тяги в начальный момент времени в зависимости от длины немагнитной вставки статора

Fig. 7. Values of the pulling force at the initial moment of time depending on the length of the non-magnetic stator spacer

С увеличением длины немагнитной вставки статора, магнитного сопротивления, уменьшается максимальная скорость якоря и его ускорение. Это хорошо видно на графике (рис. 8). Амплитуда соответствующих пиков с увеличением длины уменьшается, а также снижается величина скорости, до которой разгоняется якорь за определенный промежуток времени. При длине вставки 8 мм якорь за 4 мс успевает разогнаться до скорости 1,5 м/с, а при 18 мм – всего до 0,95 м/с.



Р и с. 8. Изменение скорости якоря во времени в зависимости от длины немагнитной вставки статора

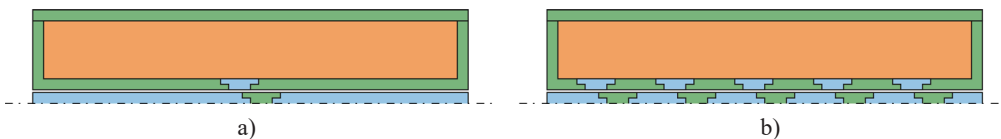
Fig. 8. Change in the armature speed over time depending on the length of the non-magnetic stator

Уменьшение длины немагнитной вставки статора позволяет добиться улучшения ряда рабочих характеристик линейного двигателя. Однако, несмотря на полученные положительные результаты, был выявлен и существенный недостаток в работе электродвигателя. С уменьшением длины немагнитной вставки статора сокращается расстояние, на которое смещается якорь для достижения положения равновесия, что приводит к убыванию полезной длины хода. Так, изменяя длину немагнитной вставки, возможно получить два конечных результата: либо наибольшее усилие, либо максимальный рабочий ход.

Если одно магнитное кольцо якоря втягивается с одним значением усилия, можно предположить, что два кольца будут втягиваться с силой в два раза большей. Магнитный поток, проходя воздушный зазор между статором и якорем, воздействует на ферромагнитное кольцо якоря. Следовательно, увеличение количества магнитных колец в составе магнитопровода якоря даст возможность добиться существенного повышения силы тяги на подвижном элементе линейного электродвигателя.

Для подтверждения выдвинутой гипотезы были разработаны конструкции импульсных линейных электродвигателей с различным количеством немагнитных вставок на статоре и соответствующим числом магнитных колец на якоре.

Количество НС было принято в диапазоне от 1 (рис. 9 а) до 5 (рис. 9 б), поскольку 5 – максимальное количество вставок, которое может быть использовано при текущих линейных размерах электродвигателя. Количество МЯ равно количеству НС. Размер НС принят 8 мм, размер МЯ – 11 мм.



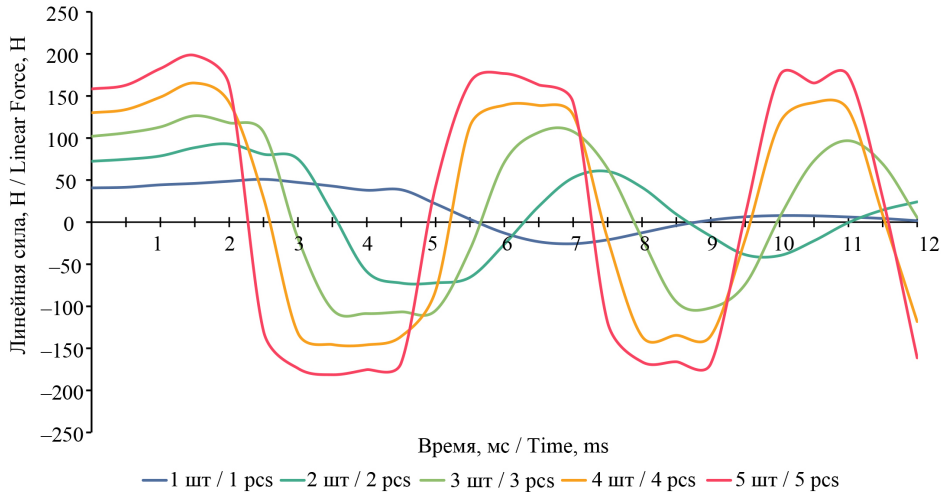
Р и с. 9. Количество немагнитных вставок статора: а) одна; б) пять

F i g. 9. Number of non-magnetic stator spacers: a) one; b) five

Когда количество НС и МЯ стало отличным от одного, потребовалось наличие между ними «противоположных» вставок. Немагнитные вставки статора разделились магнитными втулками статора (МС), а магнитные кольца якоря – немагнитными вставками якоря. Размер МС – 19,2 мм, размер немагнитных вставок якоря – 16,2 мм.

На графике (рис. 10) хорошо видно, что, как и предполагалось, с увеличением количества немагнитных вставок статора в магнитопроводе двигателя, возрастает сила тяги на якоре. Также увеличивается время, в течение которого якорь осциллирует около положения равновесия. Это наглядно видно при сравнении кривых для 1 вставки и 5 вставок. К моменту 11,5 мс якорь с 1 немагнитной вставкой статора за 1 период (если отсчитывать от момента первого пересечения графиком оси абсцисс) почти закончил колебания, в то время как якорь с 5 немагнитными вставками статора спустя 2 периода лишь немного снизил амплитуду.

Говоря о колебаниях, важно понимать, что при использовании импульсного линейного электродвигателя в ручном инструменте полезная работа будет совершаться только за то время, пока якорь перемещается от начального положения до конечного – равновесного. Поэтому при анализе кривых основной интерес представляет лишь та их часть, что расположена до первого пересечения оси абсцисс.



Р и с. 10. Изменение силы тяги якоря в функции времени движения и в зависимости от количества немагнитных вставок статора

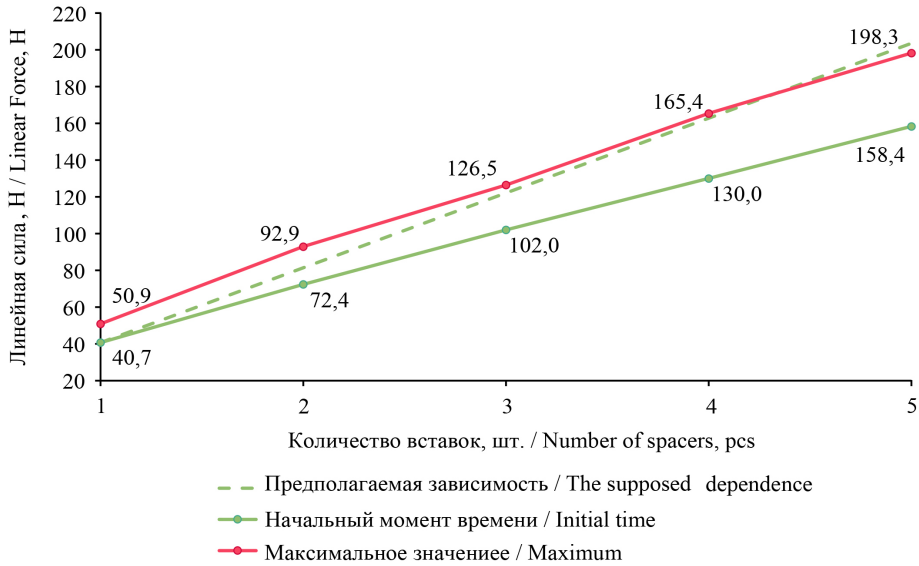
F i g. 10. Change in the armature pulling force as a function of the movement time and depending on the number of non-magnetic stator spacers

Проанализировать влияние количества немагнитных вставок статора на величину силы тяги якоря возможно, рассмотрев результаты, представленные на графике (рис. 11).

Зеленая штрихованная линия показывает предполагаемую прямо пропорциональную зависимость – с увеличением количества немагнитных вставок статора линейно возрастает сила тяги якоря. Зеленая сплошная линия демонстрирует фактические значения силы тяги, которые развиваются вторичным элементом двигателя в начальный момент времени в зависимости от количества немагнитных вставок статора. Красная непрерывная линия на графике отражает максимальные значения силы тяги в период перемещения якоря от начального положения до конечного – равновесного.

Из графика видно, что фактические значения силы тяги якоря в начальный момент времени сильно отличаются от предполагаемых. Например, максимальное значение силы тяги на якоре для магнитопровода с пятью немагнитными вставками на статоре электродвигателя существенно меньше, чем изначально предполагалось.

Полученные результаты говорят о том, что с увеличением количества немагнитных вставок статора повышается магнитное сопротивление электродвигателя.



Р и с. 11. Зависимость силы тяги якоря от количества немагнитных вставок статора для разных режимов работы линейного электродвигателя

Fig. 11. Dependence of the armature pulling force on the number of non-magnetic stator spacers for different operating modes of a linear electric motor

Зависимость максимальных значений силы тяги на якоре (рис. 11), обозначенная красным цветом, располагается выше прямой линии зеленого цвета – начальных величин силы тяги. Следовательно, с увеличением количества немагнитных вставок на статоре растет не только сила тяги, но и отношение максимальной тяги к начальной.

Подводя итог проделанным исследованиям, можно сказать, что увеличение количества немагнитных вставок в магнитопроводе статора приводит к росту силы тяги на якоре линейного электродвигателя.

ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проделанных теоретических исследований с учетом конструктивных особенностей магнитной системы линейного электродвигателя можно сделать следующие заключения.

Сравнение значения силы тяги в начальный момент времени, а также амплитуды графиков, говорит о том, что с увеличением длины НС уменьшается значение линейной силы тяги. Весьма закономерно будет предположить, что данная зависимость обусловлена увеличением магнитного сопротивления, которое необходимо преодолеть суммарному магнитному потоку.

На графике (рис. 6) прослеживается единая закономерность: после момента пуска значение силы тяги возрастает до определенного момента, пока не начинает идти на спад. Максимальное значение усилия, которое развивает электродвигатель соответствует не моменту трогания якоря, а положению, при котором магнитное кольцо якоря шунтирует ферромагнитную втулку статора, не достигая равновесного положения.

Возрастание силы тяги на якоре связано с сокращением магнитного сопротивления магнитной системы линейного двигателя из-за минимизации зазора между подвижным и неподвижным элементами, а спад усилия – с тем, что в определенный момент времени магнитное кольцо якоря оказывается в таком положении по отношению к магнитной втулке статора, что его начинает тянуть обратно, увеличивая зазор и повышая магнитное сопротивление.

Уменьшение длины немагнитной вставки с 18 до 8 мм приводит к увеличению максимально развиваемой силы тяги с 40 до 50 Н, при этом снижается время достижения максимума силы с 12 до 3 мс (увеличивается быстродействие).

В момент начала движения якоря, сила тяги минимальна и возрастает по мере движения якоря до максимального значения, которое соответствует началу шунтирования магнитной втулки статора ферромагнитным кольцом якоря, после чего она начинает убывать.

Снижения силы тяги связано с тем, что на магнитное кольцо якоря, по мере шунтирования магнитной втулки статора, начинает действовать усилие, направленное в обратную сторону движения якоря. В результате изменения магнитного сопротивления магнитопровода линейного электродвигателя в рабочем зазоре между статором и якорем наступает момент, когда две встречно направленные силы уравниваются и создаются предпосылки для полной остановки якоря.

Так же следует отметить, что при движении якоря характерно появление колебаний, которые появляются из-за инерции его движения. Перемещаясь по инерции, якорь проходит положение, для которого характерно магнитное равновесие, после чего он начинает перемещаться в обратном направлении. Чем меньше длина немагнитной вставки статора, тем выше амплитуда этих колебаний, но после 21 мс они практически затухают.

С уменьшением длины немагнитной вставки статора увеличивается скорость перемещения якоря, что говорит о повышении его быстродействия. При этом нужно учитывать, что снижение длины немагнитной вставки статора приводит к уменьшению длины рабочего хода. Поэтому выбор оптимальных параметров немагнитных вставок статора должен быть согласован с требованиями к работе рабочей машины.

Увеличение количества немагнитных вставок статора от 1 до 5 вызывает повышение силы тяги якоря с 50 до 200 Н, при этом увеличивается быстродействие с 2,5 до 1,5 мс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Уменьшение длины и увеличение количества немагнитных вставок статора линейного электродвигателя приводит к улучшению рабочих характеристик линейного электродвигателя, например, повышению силы тяги на якоре в четыре раза. Полученные результаты рекомендуется использовать при проектировании ручного инструмента с приводом от линейного электродвигателя. Это позволит снизить массогабаритные показатели, повысить энергоэффективность в процессе эксплуатации при обрезке веток в промышленных садах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Усанов К.М., Каргин В.А., Моисеев А.П., Волгин А.В. Дискретные электромагнитные приводы в процессах и технологиях сельхозпроизводства и АПК: моногр. Саратов: ООО «Амирит»; 2021. 184 с. <https://elibrary.ru/eopabd>
2. Kargin V.A., Volgin A.V., Moiseev A.P., Maradudin A.M., Leontiev A.A., Peretyatko A.V. Linear Stepping Electromagnetic Engine for Driving Conveyors. In: Journal of Physics: Conference Series: International Conference on Information Technologies in Business and Industries, ITBI 2019. Novosibirsk: Institute of Physics Publishing; 2019:052011. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1333/5/052011>
3. Usanov K.M., Volgin A.V., Kargin V.A., Moiseev A.P., Chetverikov E.A. Electric Converters of Electromagnetic Strike Machine with Battery Power. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems. Tomsk: Institute of Physics Publishing; 2018:052031. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/5/052031>
4. Усанов К.М., Мошкин В.И., Каргин В.А., Волгин А.В. Линейные электромагнитные двигатели и приводы в импульсных процессах и технологиях: моногр. Курган: Курганский государственный университет; 2015. 202 с. <https://elibrary.ru/vpdvcp>
5. Тавасиев Р.М., Кудзаев А.Б., Туриев О.И. Математическая модель гидравлической цепи обрезчика ветвей. *Аграрная наука*. 2008;(9):13. <https://elibrary.ru/juynpd>
6. Zhang J., Kang N., Qu Q., Zhou L., Zhang H. Automatic Fruit Picking Technology: A Comprehensive Review of Research Advances. *Artificial Intelligence Review*. 2024;57(54). <https://doi.org/10.1007/s10462-023-10674-2>
7. Karkee M., Gord J., Sallato B., Whiting M. Optimizing Fruit Production Efficiencies Through Mechanization. In: Achieving Sustainable Cultivation of Temperate Zone Tree Fruits and Berries. 2019. p. 347–372. <https://doi.org/10.19103/AS.2018.0040.10>
8. Khatri S., Shrestha S., Pokharel K.P. Evaluation of Manual Fruit Harvesters and Storability Characteristics of Harvested Sweet Orange Under Ordinary Room Storage Condition. *Sustainability in Food and Agriculture*. 2021;2(2):84–91. <https://doi.org/10.26480/sfna.02.2021.84.91>
9. Antonov S.N. Study of Linear Electric Motor Magnetic System of Hand-Held Electrified Tool. In: Engineering for Rural Development: 20th International Scientific Conference Engineering for Rural Development. Jelgava. 2021:1627–1631. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2021.20.TF349>
10. Никитенко Г.В., Антонов С.Н., Мазина Л.Э. Устройство съема плодов на основе линейного электродвигателя для садоводства. *Сельский механизатор*. 2025;(6):38–39. <https://elibrary.ru/wbkisi>
11. Никитенко Г.В., Антонов С.Н., Каитов М.Р. Садовая электрифицированная пила с линейным электродвигателем. *Сельский механизатор*. 2024;(12):30–31. <https://elibrary.ru/awzvoz>
12. Никитенко Г.В., Антонов С.Н., Адошев А.И., Каланчук И.В. Секатор с линейным электродвигателем для промышленного садоводства. *Сельский механизатор*. 2024;(10):36–37. <https://elibrary.ru/fwozes>
13. Никитенко Г.В., Антонов С.Н. Моделирование линейного электродвигателя для электрифицированного секатора, используемого в садоводстве. *Вестник НГИЭИ*. 2019;(10):74–84. <https://elibrary.ru/kgjqpj>
14. Kargin V., Usanov K., Moiseev A., Volgin A., Chetverikov E., Lagina L. Simulation of Energy Conversion Processes in Linear Electromagnetic Motors with Through Axial Channel. *Strojnícky časopis – Journal of Mechanical Engineering*. 2023;73(2):71–82. <https://doi.org/10.2478/scjme-2023-0022>
15. Усанов К.М., Моисеев А.П. Некоторые перспективы применения электромагнитных машин с осевым каналом в процессах и технологиях АПК. *Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова*. 2008;(7):64–67. <https://www.elibrary.ru/jspqsd>

16. Мошкин В.И., Нейман В.Ю., Угаров Г.Г. Импульсные линейные электромагнитные двигатели: моногр. Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та; 2010. 220 с. <https://www.elibrary.ru/qmhezf>
17. Moshkin V.I., Shestakov D.N., Pomyalov S.Y., Ugarov G.G. Mathematical Simulation of Electromagnetic Pulse Linear Motors. In: 2014 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, Apepe 2014: Conference Proceedings. Saratov: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc; 2014. p. 348–352. <https://doi.org/10.1109/APEDE.2014.6958275>
18. Antonov S., Nikitenko G. Linear Electric Motor For Handheld Electrified Tools Used In Gardening. In: Engineering for Rural Development: 18th International Scientific Conference Engineering for Rural Development. Jelgava; 2019. p. 804–807. <https://doi.org/10.22616/ERDev2019.18.N233>
19. Forbes M., Robertson W.S.P., Zander A.C., Paulides J.J.H. An Elemental Modelling Method for Linear Motor Parametric Studies Using Boundary-Free Analytic Magnetic Field Solutions: Including 3D Geometry, Permeability, and End Effects. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2025;(630):173416. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2025.173416>
20. Antonov S., Nikitenko G., Adoshev A., Devederkin I., Efanov A. Simulation of the Magnetic System of a Linear Motor for a Delimber. In: International Scientific-Practical Conference “Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources” (FIES 2021): Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources. Kazan: EDP Sciences; 2021. p. 00097. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20213700097>
21. Мошкин В.И., Нейман В.Ю., Угаров Г.Г. Импульсные линейные электромагнитные двигатели: моногр. Курган: Курганский государственный университет; 2010. 220 с. <https://elibrary.ru/qmhezf>
22. Усанов К.М., Мошкин В.И., Угаров Г.Г. Линейный импульсный электромагнитный привод машин с автономным питанием: моногр. Курган: Курганский государственный университет; 2006. 283 с. <https://elibrary.ru/qmeyhv>
23. Никитенко Г.В., Антонов С.Н., Мазинова Л.Э., Сергиенко Е.Г. Линейный электродвигатель. Патент 2792975 С1 Российская Федерация. 28 марта 2023. <https://elibrary.ru/hlvafj>
24. Тавасиев Р.М., Дулаев А.К., Бекузаров А.Б., Дзабиев В.З., Туриев О.И. Секатор. Патент 2142221 С1 Российская Федерация. 12 октября 1999. <https://elibrary.ru/aiypvi>
25. Hsieh M.-F., Tung C.-J., Yao W.-S., Wu M.-C., Liao Y.-S. Servo Design of a Vertical Axis Drive Using Dual Linear Motors for High Speed Electric Discharge Machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2007;47(3–4):546–554. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.05.011>
26. Guo G., Zhao Y., Yu A. Analysis of Electromagnetic Vibration of Submerged Tubular Linear Motors Based on Wave Propagation Approach. *Wave Motion*. 2024;(127):103287. <https://doi.org/10.1016/j.wavemoti.2024.103287>

REFERENCES

1. Usanov K.M., Kargin V.A., Moiseev A.P., Volgin A.V. [Discrete Electromagnetic Drives in Agricultural Production Processes and Technologies]: A Monography. Saratov: LLC “Amirit”; 2021. 184 p. (In Russ.) <https://elibrary.ru/eopabd>
2. Kargin V.A., Volgin A.V., Moiseev A.P., Maradudin A.M., Leontiev A.A., Peretyatko A.V. Linear Stepping Electromagnetic Engine for Driving Conveyors. In: Journal of Physics: Conference Series: International Conference on Information Technologies in Business and Industries, ITBI 2019. Novosibirsk: Institute of Physics Publishing; 2019:052011. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1333/5/052011>
3. Usanov K.M., Volgin A.V., Kargin V.A., Moiseev A.P., Chetverikov E.A. Electric Converters of Electromagnetic Strike Machine with Battery Power. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems. Tomsk: Institute of Physics Publishing; 2018:052031. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/5/052031>

4. Usanov K.M., Moshkin V.I., Kargin V.A., Volgin A.V. [Linear Electromagnetic Motors and Drives in Pulse Processes and Technologies]: A Monography. Kurgan: Kurgan State University; 2015. 202 p. (In Russ.) <https://elibrary.ru/vpdvcp>
5. Tavasiev R.M., Kudzaev A.B., Turiev O.I. Mathematical Model of Hydraulic Chain of Branch Cutter. *Agrarian science*. 2008;(9):13. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/juynpd>
6. Zhang J., Kang N., Qu Q., Zhou L., Zhang H. Automatic Fruit Picking Technology: A Comprehensive Review of Research Advances. *Artificial Intelligence Review*. 2024;57(54). <https://doi.org/10.1007/s10462-023-10674-2>
7. Karkee M., Gord J., Sallato B., Whiting M. Optimizing Fruit Production Efficiencies Through Mechanization. In: Achieving Sustainable Cultivation of Temperate Zone Tree Fruits and Berries. 2019. p. 347–372. <https://doi.org/10.19103/AS.2018.0040.10>
8. Khatri S., Shrestha S., Pokharel K.P. Evaluation of Manual Fruit Harvesters and Storability Characteristics of Harvested Sweet Orange Under Ordinary Room Storage Condition. *Sustainability in Food and Agriculture*. 2021;2(2):84–91. <https://doi.org/10.26480/sfna.02.2021.84.91>
9. Antonov S.N. Study of Linear Electric Motor Magnetic System of Hand-Held Electrified Tool. In: Engineering for Rural Development: 20th International Scientific Conference Engineering for Rural Development. Jelgava. 2021:1627–1631. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2021.20.TF349>
10. Nikitenko G.V., Antonov S.N., Mazinova L.E. Fruit Removal Device Based on Linear Electric Motor for Horticulture. *Selskiy Mechanizator*. 2025;(6):38–39. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/wbkisi>
11. Nikitenko G.V., Antonov S.N., Kaitov M.R. Garden Electric Saw with Linear Electric Motor. *Selskiy Mechanizator*. 2024;(12):30–31. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/awzvoz>
12. Nikitenko G.V., Antonov S.N., Adoshev A.I., Kalanchuk I.V. Secateur with Linear Electric Motor for Industrial Gardening. *Selskiy Mechanizator*. 2024;(10):36–37. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/fwozes>
13. Nikitenko G.V., Antonov S.N. Modeling Linear Electric Motor for an Electrified Secator Used in Gardening. *NGIEI Bulletin*. 2019;(10):74–84. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/kgjqpj>
14. Kargin V., Usanov K., Moiseev A., Volgin A., Chetverikov E., Lagina L. Simulation of Energy Conversion Processes in Linear Electromagnetic Motors with Through Axial Channel. *Strojnickiy časopis – Journal of Mechanical Engineering*. 2023;73(2):71–82. <https://doi.org/10.2478/scjme-2023-0022>
15. Usanov K.M., Moiseev A.P. Somewhat About the Perspectives to Use of the Elektromagnetic Machines with Axial Canal in The Processes and Tehnologies of Aic. *The Bulletin Saratov State Agrarian University in Honor of N. I. Vavilov*. 2008;(7):64–67. (In Russ., abstract in Eng.) <https://www.elibrary.ru/jspqsd>
16. Moshkin V.I., Neiman V.Yu., Ugarov G.G. [Pulse Linear Electromagnetic Motors]: A Monography. Kurgan: Publishing House of Kurgan State University; 2010. 220 p. (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/qmhezf>
17. Moshkin V.I., Shestakov D.N., Pomyalov S.Y., Ugarov G.G. Mathematical Simulation of Electromagnetic Pulse Linear Motors. In: 2014 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, Apepe 2014: Conference Proceedings. Saratov: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc; 2014. p. 348–352. <https://doi.org/10.1109/APEDE.2014.6958275>
18. Antonov S., Nikitenko G. Linear Electric Motor For Handheld Electrified Tools Used In Gardening. In: Engineering for Rural Development: 18th International Scientific Conference Engineering for Rural Development. Jelgava; 2019. p. 804–807. <https://doi.org/10.22616/ERDev2019.18.N233>
19. Forbes M., Robertson W.S.P., Zander A.C., Paulides J.J.H. An Elemental Modelling Method for Linear Motor Parametric Studies Using Boundary-Free Analytic Magnetic Field Solutions: Including 3D Geometry, Permeability, and End Effects. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2025;(630):173416. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2025.173416>

20. Antonov S., Nikitenko G., Adoshev A., Devederkin I., Efanov A. Simulation of the Magnetic System of a Linear Motor for a Delimber. In: International Scientific-Practical Conference "Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources" (FIES 2021): Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources. Kazan: EDP Sciences; 2021. p. 00097. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20213700097>
21. Moshkin V.I., Neiman V.Yu., Ugarov G.G. [Pulsed Linear Electromagnetic Motors]: A Monography. Kurgan: Kurgan State University; 2010. 220 p. (In Russ.) <https://elibrary.ru/qmhezf>
22. Usanov K.M., Moshkin V.I., Ugarov G.G. [Linear Pulse Electromagnetic Drive of Machines With Autonomous Power Supply]: A Monography. Kurgan: Kurgan State University; 2006. 283 p. (In Russ.) <https://elibrary.ru/qmeyhv>
23. Nikitenko G.V., Antonov S.N., Mazinova L.E., Sergienko E.G. Linear Electric Motor. Patent 2792975 C1 Russian Federation. 2023 March 28. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/hlvafj>
24. Tavasiev R.M., Dulaev A.K., Bekuzarov A.B., Dzabiev V.Z., Turiev O.I. Pruner. Patent 2142221 C1 Russian Federation. 1999 October 12. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/aiypvi>
25. Hsieh M.-F., Tung C.-J., Yao W.-S., Wu M.-C., Liao Y.-S. Servo Design of a Vertical Axis Drive Using Dual Linear Motors for High Speed Electric Discharge Machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2007;47(3–4):546–554. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.05.011>
26. Guo G., Zhao Y., Yu A. Analysis of Electromagnetic Vibration of Submerged Tubular Linear Motors Based on Wave Propagation Approach. *Wave Motion*. 2024;(127):103287. <https://doi.org/10.1016/j.wavemoti.2024.103287>

Об авторах:

Никитенко Геннадий Владимирович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электрооборудования и энергообеспечения АПК Ставропольского государственного аграрного университета (355035, Российская Федерация, г. Ставрополь, пер. Зоотехнический, д. 12), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2797-0755>, Researcher ID: N-1769-2014, Scopus ID: 57202640003, SPIN-код: 9068-0520, nikitenko_gv@mail.ru

Антонов Сергей Николаевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электрооборудования и энергообеспечения АПК Ставропольского государственного аграрного университета (355035, Российская Федерация, г. Ставрополь, пер. Зоотехнический, д. 12), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8931-269X>, Researcher ID: V-1081-2017, Scopus ID: 57021226800, SPIN-код: 2575-3686, antonov_serg@mail.ru

Гаркавенко Никита Сергеевич, аспирант кафедры электрооборудования и энергообеспечения АПК Ставропольского государственного аграрного университета (355035, Российская Федерация, г. Ставрополь, пер. Зоотехнический, д. 12), ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-5948-391X>, Researcher ID: KCR-2037-2024, SPIN-код: 8319-7266, furfurlis@mail.ru

Вклад авторов:

Г. В. Никитенко – формулирование замысла / идеи исследования, целей и задач.

С. Н. Антонов – разработка или проектирование методологии исследования; создание моделей.

Н. С. Гаркавенко – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов или сбор данных / доказательств.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 29.09.2025; поступила после рецензирования 09.02.2026;
принята к публикации 27.02.2026*

About the authors:

Gennady V. Nikitenko, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Electrical Equipment and Power Supply of the Agro-Industrial Complex, Stavropol State Agrarian University (12 Zootekhnichesky Lane, Stavropol 355035, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2797-0755>, Researcher ID: N-1769-2014, Scopus ID: 57202640003, SPIN-code: 9068-0520, nikitenko_gv@mail.ru

Sergey N. Antonov, Cand.Sc. (Eng.), Associate Professor, the Department of Electrical Equipment and Power Supply for the Agricultural Sector, Stavropol State Agrarian University (12 Zootekhnichesky Lane, Stavropol 355035, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8931-269X>, Researcher ID: V-1081-2017, Scopus ID: 57021226800, SPIN-code: 2575-3686, antonov_serg@mail.ru

Nikita S. Garkavenko, Post-Graduate Student of the Department of Electrical Equipment and Power Supply for the Agricultural Sector, Stavropol State Agrarian University (12 Zootekhnichesky Lane, Stavropol 355035, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-5948-391X>, Researcher ID: KCR-2037-2024, SPIN-code: 8319-7266, furfurlis@mail.ru

Authors contribution:

G. V. Nikitenko – formulating the study ideas, aims and objectives.

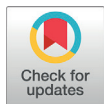
S. N. Antonov – developing the study methodology; creating models.

N. S. Garkavenko – conducting the study, specifically performing the experiments, or collecting data/evidence.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 29.09.2025; revised 09.02.2026; accepted 27.02.2026

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ / ELECTRICAL TECHNOLOGY AND ELECTRICAL EQUIPMENT



<https://doi.org/10.15507/2658-4123.26362.367-391>

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

УДК / UDK 637.233:637.133.3

Оригинальная статья / Original article

Научно-методические основы расчета параметров электродного термосифонного нагревателя молока при пастеризации

А. А. Багаев, С. О. Бобровский 

*Алтайский государственный аграрный университет,
г. Барнаул, Российская Федерация, <https://ror.org/01jsr8a3>*

 sergej.bobrovskij.95@mail.ru

Аннотация

Введение. Термическая обработка способствует повышению качества молока и молочных продуктов, снижая количество патогенных микроорганизмов и ферментных систем при условии определенных сочетаний температурных режимов и времени нагрева. Наибольшей эффективностью обладает система «термосифонный пастеризатор с использованием прямого или косвенного электронагрева» с замкнутым циклом парообразования и конденсации. При этом существует необходимость снижения затрат энергии на нагрев молока и разработки методики расчета проточного нагревателя молока при пастеризации, учитывающей расчетные, гидро- и термодинамические характеристики электродного нагревателя.

Цель исследования. Теоретическое и экспериментальное обоснование методики расчета параметров проточного электродного термосифонного нагревателя, позволяющей повысить коэффициент полезного действия нагревателя молока в технологическом процессе пастеризации при заданной конечной температуре и производительности в установившемся равновесном режиме.

Материалы и методы. Используются основные положения теории технической гидро- и термодинамики, теплообмена и теплопередачи, методы теории подобия, электротермии и электродного нагрева сопротивлением.

Результаты исследования. Описана методика расчета параметров на примере электродного термосифонного нагревателя со змеевиковым теплообменником из пищевой нержавеющей стали. Она предусматривает последовательное определение: составляющих тепловых потоков в термосифонном электродном нагревателе при изохорном термодинамическом режиме; расхода конденсата; площади нагрева змеевикового теплообменника при заданной производительности по молоку; мощности электродного нагревательного устройства; геометрических размеров электродной системы. После этого подразумевается экспериментальная поверка и проверка по допустимым значениям напряженности электрического поля и плотности тока.

© Багаев А. А., Бобровский С. О., 2026



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. Представленная методика расчета позволяет в равновесном режиме теплообмена согласовать геометрические и энергетические характеристики электродной системы электротехнологического нагревателя с параметрами змеевикового теплообменника известной производительности по молоку, с результатами экспериментальной проверки предлагаемой технологии с учетом гидро- и термодинамических параметров. Практическая значимость заключается в обоснованной возможности снижения затрат энергии на нагрев молока в термических процессах обработки на 15–16 % по сравнению с известными технологиями, где коэффициент полезного действия составляет 84–88 %. Перспективным направлением является изучение влияния саморегулирования мощности нагревателя при использовании компенсационной емкости и уровня водного раствора электролита в межэлектродном промежутке на результаты нагрева с последующей оптимизацией параметров и режимов.

Ключевые слова: нагрев молока, пастеризация, снижение затрат энергии, электро-термия, электродный нагрев, термосифон, змеевиковый теплообменник

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Багаев А.А., Бобровский С.О. Научно-методические основы расчета параметров электродного термосифонного нагревателя молока при пастеризации. *Инженерные технологии и системы.* 2026;36(2):367–391. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.26362.367-391>

Scientific and Methodological Bases for Calculating the Parameters of Electrode Thermosiphon Milk Heaters in Pasteurizing

A. A. Bagaev, S. O. Bobrovskiy 

Altai State Agricultural University,

Barnaul, Russian Federation, <https://ror.org/01jsr8a33>

 *sergej.bobrovskij.95@mail.ru*

Abstract

Introduction. Thermal treatment is a technology that ensures guaranteed quality of milk and dairy products in terms of pathogenic microorganisms and enzyme systems, under specific combinations of temperature regimes and heating times. The most effective is the “thermosiphon pasteurizer using direct or indirect electrical heating” with a closed cycle of vaporization and condensation. But it is important to reduce energy costs for heating milk and develop a calculation method for a tankless milk heater parameters for pasteurizing taking into account the hydro-thermodynamic and design characteristics of the electrode heater.

Aim of the Study. The study is aimed at developing the theoretical and experimental justification of a method for calculating the parameters of a tankless electrode thermosiphon heater to increase the efficiency of the milk heater in pasteurizing at a given final milk temperature and capacity in a steady-state equilibrium mode.

Materials and Methods. There were used the basic provisions of the theory of hydrodynamics and thermodynamics, heat exchange and heat transfer, the methods of similarity theory, electrothermics and electrode resistance heating.

Results. There has been described the technique for calculating parameters on the example of an electrode thermosiphon heater with a coil heat exchanger made of food-grade stainless steel. This technique includes the sequential determination of: the components of heat

flows in a thermosiphon electrode heater under an isochoric thermodynamic regime; the flow rate of condensate; the heating area of a coil heat exchanger at given milk production rate; the power of an electrode heating device; the geometric dimensions of an electrode system. After this, experimental verification and testing of permissible values of electric field strength and current density are implied.

Discussion and Conclusion. The presented calculation method allows in the equilibrium heat exchange mode agreeing the geometric and energy characteristics of the electrode system of the electro-technological heater with the parameters of the coil heat exchanger of known milk productivity, the results of the experimental verification of the proposed technology, taking into account the hydro- and thermodynamic parameters. The results of the study not contradict the results of the previous research conducted by the authors. The practical significance lies in the justified possibility of reducing the energy consumption for heating milk in thermal processing by 15–16% compared to the known technologies with a coefficient of efficiency of 84–88%. A promising area of research aimed at reducing energy consumption for milk heating, depending on the initial data of the technological process, is the study of the effect of self-regulation of the heater power using a compensatory capacity and the level of the aqueous solution.

Keywords: milk heating, pasteurization, reducing energy consumption, electrothermics, electrode heating, thermosiphon, coil heat exchanger

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

For citation: Bagaev A.A., Bobrovskiy S.O. Scientific and Methodological Bases for Calculating the Parameters of Electrode Thermosiphon Milk Heaters in Pasteurizing. *Engineering Technologies and Systems*. 2026;36(2):367–391. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.26362.367-391>

ВВЕДЕНИЕ

Повышение энергоэффективности технологических процессов переработки сельскохозяйственной продукции, включая пастеризацию молока и молочных продуктов, производимых в фермерских и личных подсобных хозяйствах, является актуальной научно-технической проблемой.

Тематика исследования соответствует важнейшим направлениям развития сельского хозяйства Российской Федерации: приоритету Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации¹ – переход к высокопродуктивному и экологически чистому агро- и аквахозяйству, разработка и внедрение систем рационального применения средств химической и биологической защиты сельскохозяйственных растений и животных, хранение и эффективная переработка сельскохозяйственной продукции, создание безопасных и качественных, в том числе функциональных, продуктов питания; одной из ключевых задач Федеральной научно-технической программы «Развитие сельского хозяйства на 2017–2030 гг.»² – создание и внедрение современных технологий производства, переработки и хранения сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия.

¹ О стратегии научно-технологического развития Российской Федерации: Указ Президента РФ от 28 февраля 2024 г. № 145. [Электронный ресурс]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202402280003> (дата обращения: 22.06.2025).

² Об утверждении Федеральной научно-технической программы развития сельского хозяйства на 2017–2030 годы. Постановление Правительства РФ от 25 августа 2017 г. № 996. [Электронный ресурс]. URL: <https://base.garant.ru/71755402/> (дата обращения: 22.06.2025).

Известные инновационные методы обеззараживания молока (ультразвуковые, облучательные, гидродинамические и др.), конечной целью которых является уничтожение патогенной микрофлоры и ее ферментных систем (фосфатаза), характеризуются или недостаточной изученностью, или малой производительностью, или периодичностью и в настоящее время не получили широкого распространения.

Термическая обработка по-прежнему является технологией, обеспечивающей гарантированное качество молока и молочных продуктов по низкому содержанию патогенных микроорганизмов и ферментных систем при условии определенных сочетаний температурных режимов и времени нагрева. Однако традиционные методы нагрева молока, такие как «пар-молоко» и «горячая вода – молоко», функционирующие с разомкнутым циклом нагрева первичного теплоносителя из внешнего источника с низкой энтальпией, характеризуются высокой энергоемкостью.

Противоречие между необходимостью снижения энергозатрат на нагрев молока в процессе пастеризации и отсутствием методов, а также технических средств для его реализации составляет содержание научно-технической проблемы.

Решением может служить исключение этапа нагрева первичного теплоносителя с повышением его энтальпии или организация процесса без его использования. Повышение энтальпии первичного теплоносителя возможно с использованием термосифонного цикла с замкнутым циклом парообразования и конденсации без использования внешнего источника посредством косвенного элементного, прямого электродного или индукционного нагрева. Особенностью термосифонного термодинамического процесса является равенство температур, обладающих различными значениями энтальпии конденсата и конденсирующегося пара. Полный отказ от нагрева первичного теплоносителя предполагает применение индукционного нагрева теплообменника.

Кроме того, известные методики расчета параметров и режимов работы проточных электродных нагревателей не учитывают процессы гидро- и термодинамики и теплообмена.

Целью исследования является оценка затрат энергии на нагрев молока путем обоснования и использования методики расчета параметров электродного термосифонного нагревателя молока при пастеризации. Для этого необходимо проанализировать существующие технологии нагрева молока в процессе пастеризации; разработать методику расчета электродного термосифонного нагревателя и изготовить экспериментальную установку на основании расчетных параметров; провести экспериментальные исследования нагрева молока с использованием этой установки, дать оценку затрат энергии на нагрев и представить статистическую оценку результатов.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В настоящее время известны такие методы нагрева пищевых материалов в процессе обеззараживания, как обработка ультразвуком, инфракрасным и ультрафиолетовым облучением, энергией солнца, токами сверхвысокой частоты и др.

Исследователи из Австралии и Саудовской Аравии систематизировали результаты исследований в области ультразвуковой обработки молока и молочных

продуктов, оценили ее эффективность и перспективы применения в промышленности [1]. Дальнейшие исследования должны быть направлены на преодоление существующих ограничений (неравномерность обработки в больших объемах, высокая стоимость оборудования, необходимость точного контроля параметров для предотвращения нежелательных изменений продукта, потребность в комбинировании с другими методами для уничтожения спор) и оптимизацию технологии для широкого промышленного применения.

Анализ других исследований демонстрирует развитие нетепловых и комбинированных методов пастеризации в молочной промышленности, включая технологии с применением инфракрасного и ультрафиолетового излучения [2–4]. Оба метода характеризуются недостаточной экспериментальной проверкой и отсутствием комплексной оценки качества продукта и экономической эффективности. Для практического внедрения данных технологий требуются дополнительные экспериментальные исследования и оптимизация конструкции под реальные производственные условия.

Зарубежные исследователи подтверждают принципиальную возможность использования солнечной энергии для пастеризации молока, но выявляют общие недостатки и направления для совершенствования технологии [5; 6]. К ним относятся: сильная зависимость производительности от погодных условий; длительное время нагрева; зависимость от интенсивности солнечной радиации; необходимость резервных источников тепла в пасмурную погоду. Наибольший потенциал солнечная пастеризация имеет в солнечных регионах с высокой инсоляцией и ограниченным доступом к традиционным источникам энергии.

Проведены исследования технологии пастеризации посредством воздействия токов сверхвысокой частоты [7; 8]. Указанные удельные энергетические затраты в диапазоне 4,35–5,55 Вт·ч/л на порядок ниже значений, типичных для процессов нагрева пищевых продуктов. Проведение дополнительных опытных проверок позволит либо выявить погрешности в ранее полученных данных, либо объяснить механизм, обеспечивающий снижение энергозатрат.

Разработан и протестирован прототип нетеплового пастеризатора для молока на основе электрического поля [9]. Ученые из Пакистана рассмотрели различные нетепловые методы обработки молока (электрическое поле, высокое гидростатическое давление, ультразвук, облучение, холодная плазма и др.), их влияние на патогенные и вызывающие порчу микроорганизмы, а также на качество продукта [10]. Широкое применение нетепловых методов обработки продукта ограничено техническими проблемами масштабирования, коррозией, перегревом и гидравлическим сопротивлением, недостатком долгосрочных данных о стабильности продукта и неполнотой информации о влиянии на все компоненты молока.

В настоящее время распространение получили технологии нагрева молока и молочных продуктов, в которых промежуточным теплоносителем выступает вода или водяной пар той или иной степени насыщения [11; 12]. В этом случае система характеризуется разомкнутым циклом подачи питательной воды в зону нагрева или парообразования из внешнего источника. Процесс нагрева воды и получения водяного пара носит неспецифический характер и может быть обеспечен в том

числе такими известными электротехнологическими средствами, как косвенный (элементный) или прямой (электродный, индукционный) нагрев.

Оценка потенциальной возможности применения индукционного нагрева пищевых продуктов с анализом перспектив развития и недостатков предпринята в исследованиях зарубежных и российских ученых [13–15]. Применение данного метода обработки сопряжено с определенными недостатками: неравномерное распределение теплового потока по сечению трубы может приводить к перегреву и пригоранию молока возле стенок, в то время как в глубине потока продукт не успевает прогреться до необходимой температуры; требуется адаптация конструкций для равномерного нагрева молока в потоке [16–18]. Установлено, что индукционные коаксиальные нагреватели промышленной частоты отличаются большими габаритами и низким КПД по причине превышения токов в индукторе над токами в нагреваемой трубе [19].

Произведен анализ трех процессов нагрева молока: традиционного с разомкнутым циклом подачи питательной воды в зону нагрева и парообразования из внешнего источника; термосифонного электродного с замкнутым циклом парообразования и конденсации без использования внешнего источника питающей воды; индукционного на основании энергетического и эксергетического анализа [20]. При этом в качестве оценки энергетической эффективности процесса принят коэффициент полезного действия, основанный на первом законе термодинамики. В свою очередь, оценка эксергетической эффективности основана на втором законе термодинамики и представляет собой отношение эксергии на выходе (общей выработке энергии) к эксергии на входе (общей потребляемой энергии).

На основании результатов проведенного сопоставительного анализа установлено, что наибольшей энергоэффективностью с точки зрения энергетического и эксергетического анализа обладает система «нагреватель термосифонного типа с использованием прямого или косвенного электронагрева», преимущество которой обусловлено замкнутым циклом парообразования, при котором в пар превращается конденсат, имеющий температуру пара, и позволяет снизить энергозатраты на 15–16 %.

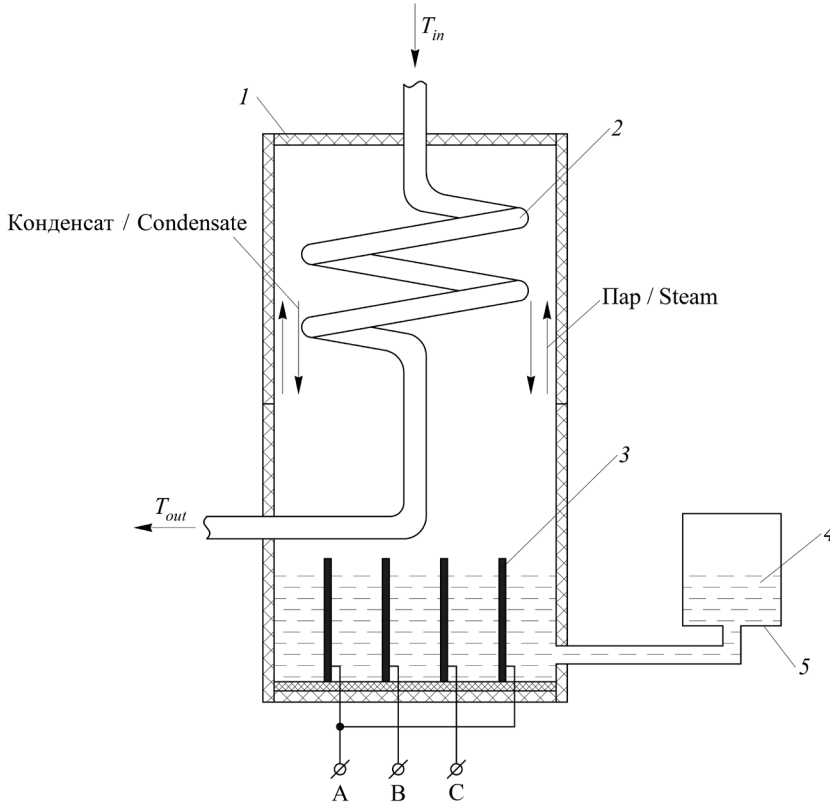
МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования

В основу принципа работы и устройства, принятого в качестве объекта исследования положены разработанные патенты [21; 22]. Рассматривается термосифонный электродный пастеризатор со змеевиковым теплообменником и плоскопараллельной системой электродов, общий вид которого представлен на рисунке 1.

Устройство содержит корпус 1 с неизменным внутренним объемом, внутри которого располагается змеевиковый теплообменник 2 из аустенитной нержавеющей стали AISI-304 и система плоскопараллельных электродов 3, межэлектродное расстояние которой заполняется водой 4. Электроды подключаются к трехфазной системе напряжения, а через теплообменник пропускается нагреваемое молоко. В результате протекания электрического тока вода, заполняющая межэлектродное пространство, нагревается до температуры кипения и, преобразуясь в пар, по-

ступает к теплообменнику. Пар конденсируется на внешней поверхности трубки теплообменника и отдает свою внутреннюю энергию нагреваемому молоку. Образовавшийся конденсат частично возвращается в межэлектродное пространство как напрямую, так и через компенсационную емкость 5, что обеспечивает замкнутость цикла и стабильность работы устройства.



Р и с. 1. Устройство и принцип действия термосифонного электродного проточного пастеризатора:

- 1 – корпус; 2 – змеевиковый теплообменник из нержавеющей стали AISI-304;
3 – плоскопараллельная система электродов; 4 – первичный теплоноситель (вода);
5 – компенсационный резервуар

F i g. 1. Device and principle of operation of a thermosiphon electrode tankless pasteurizer:
1 – body; 2 – coil heat exchanger made of AISI-304 stainless steel; 3 – flat-parallel electrode system;
4 – primary heat carrier (water); 5 – compensation tank

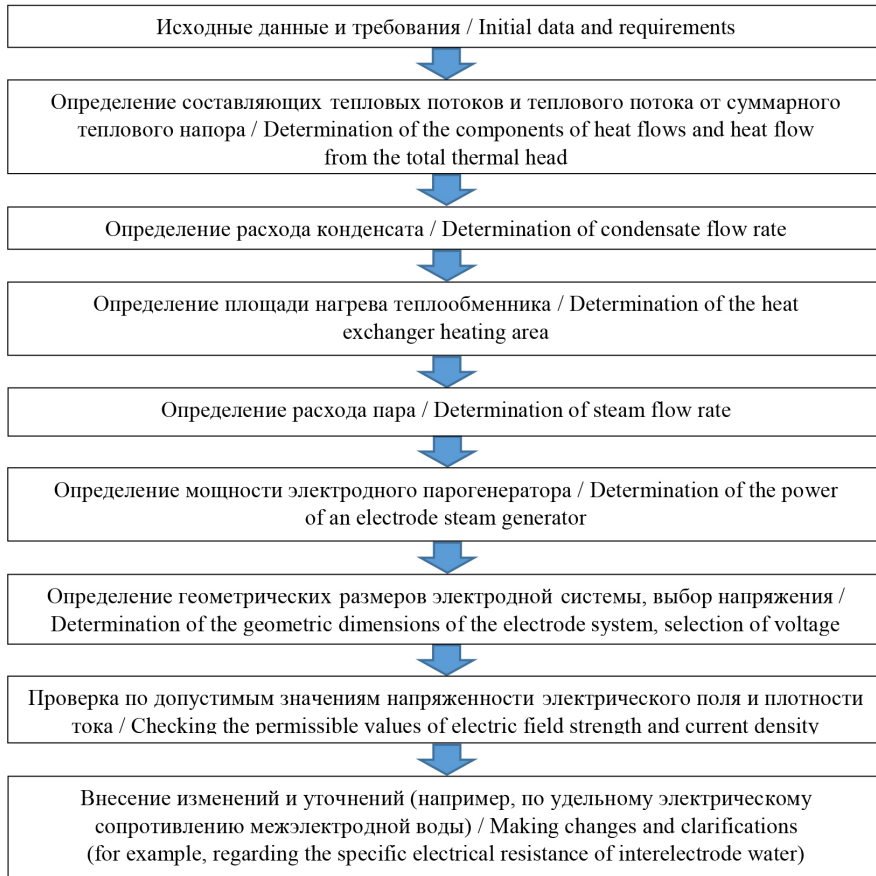
Примечание: T_{in} – температура молока на входе в теплообменник, °C; T_{out} – температура молока на выходе, °C.

Note: T_{in} – milk temperature at the inlet to the heat exchanger, °C; T_{out} – milk temperature at the outlet, °C.

Источник: рисунки 1, 3, 4, 8, 9 составлены авторами статьи в программе Компас 16.

Source: figures 1, 3, 4, 8, 9 are compiled by the authors using the program Compass 16.

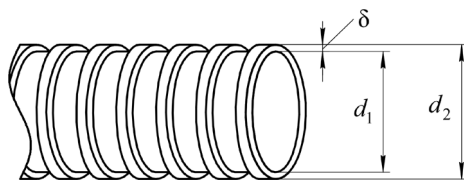
Структура предлагаемой методики показана на рисунке 2.



Р и с. 2. Структура предлагаемой методики
 F i g. 2. Structure of the proposed methodology

Источник: рисунок 2 составлен авторами статьи.
Source: figure 2 was compiled by the authors of the article.

С целью обобщения результатов исследования рассмотрены два варианта исполнения змеевикового теплообменника. В соответствии с первым, теплообменник выполнен в виде гофрированной трубки из нержавеющей стали AISI-304 со средним внутренним диаметром $d_{1avr} = 14,5$ мм, средним внешним диаметром $d_{2avr} = 16,5$ мм (рис. 3).



Р и с. 3. Общий вид и размеры гофрированной трубки змеевикового теплообменника из нержавеющей стали AISI-304

F i g. 3. General view and dimensions of a corrugated tube of a coil heat exchanger made of AISI 304 stainless steel

Примечание: δ – толщина стенки теплообменника, м; d_1 – внутренний диаметр трубки теплообменника, м; d_2 – внешний диаметр трубки теплообменника, м.

Note: δ – the heat exchanger wall thickness, m; d_1 – the inner diameter of the heat exchanger tube, m; d_2 – outer diameter of the heat exchanger tube, m.

Второй вариант предусматривает использование негофрированной стандартной трубки с внутренним диаметром $d_1 = d_{1avr}$ и внешним диаметром $d_2 = d_{2avr}$, что не оказывает влияния на ход дальнейших рассуждений. Второй вариант при нагреве молока является более предпочтительным в силу отсутствия белково-жировых отложений на внутренней поверхности теплообменника и упрощения санитарных мероприятий в процессе промывки оборудования.

Методы, оборудование и процедура исследования

В качестве материалов исследования были использованы молоко с расходом $G_1 = 8,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{ч}$, водные растворы электролита с удельным сопротивлением $\rho = 264 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ при содержании соли 2 мг/кг, нержавеющая сталь AISI 304.

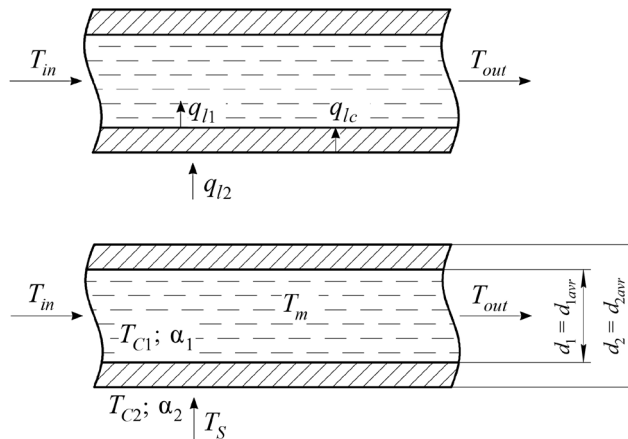
Использованы основные положения теории и методы технической гидродинамики, теплоотдачи при конденсации пара и вынужденном движении жидкости в трубе теплопередачи через стенку теплообменника, методы теории подобия, электротермии и электродного прямого нагрева сопротивлением, методы измерения электротехнических величин.

Процедура исследования включала: определение параметров проточного электродного термосифонного нагревателя молока согласно условиям технического задания в соответствии с разработанной концепцией методики расчета; изготовление прототипа нагревательной установки и экспериментальную проверку ее работоспособности; статистическую обработку воспроизводимости результатов. В процессе испытаний использованы технические средства измерения температуры, давления пара и регистрации электротехнических параметров. Расход и температура продукта контролировались расходомером YF-B7 и цифровым измерителем температуры TM902C, давление пара – манометром TM-510P. Ток, напряжение и мощность $P_{exc,los}$, кВт, фиксировались измерительным комплексом K-505.

На внешней поверхности змеевикового теплообменника конденсируется водяной пар с давлением $p = 2,0245 \cdot 10^5 \text{ Па}$ при температуре 120 °С, источником которого является электродный парогенератор. Конденсат имеет температуру конденсирующегося пара, но обладает в результате теплообмена в 5 с лишним раз меньшим значением энтальпии. В этом заключается особенность

рассматриваемого замкнутого термодинамического цикла. Расход нагреваемого молока $G_1 = 8,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{мин} = 498 \text{ кг/ч} \approx 500 \text{ кг/ч}$. Начальная температура охлажденного молока на входе в теплообменник $T_{in} = 4 \text{ }^\circ\text{C}$, конечная на выходе $-T_{out} = 76 \text{ }^\circ\text{C}$. Теплопроводность нержавеющей стали AISI-304 $\lambda_{\text{AISI}} = 16,2 \dots 16,3 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$, ее удельное электрическое сопротивление $\rho_{\text{AISI-304}} = 7,2 \cdot 10^{-7} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ при температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Анализ произведен в предположении, что термодинамический процесс считается изохорным, т. е. предполагает постоянство объема испарительно-конденсационной системы при отсутствии совершаемой паром внешней работы.

На рисунке 4 представлена схема тепловых потоков, отнесенных к 1-му м трубки теплообменника, имеющих место в процессе функционирования устройства.



Р и с. 4. Схема тепловых потоков, отнесенных к 1-му м трубки теплообменника

F i g. 4. Diagram of heat flows per 1 m of heat exchanger tube

Примечание: q_{i1} – тепловой поток, передаваемый от внутренней поверхности трубки теплообменника к молоку, $\text{Вт}/\text{м}^2$; q_{l2} – тепловой поток, передаваемый от конденсирующегося пара к внешней поверхности трубки теплообменника, $\text{Вт}/\text{м}^2$; q_{ic} – тепловой поток, передаваемый через стенку трубки теплообменника, $\text{Вт}/\text{м}^2$; T_{C1} – температура внутренней поверхности трубки теплообменника, $^\circ\text{C}$; T_{C2} – температура внешней поверхности трубки теплообменника, $^\circ\text{C}$; T_S – температура конденсирующегося пара, $^\circ\text{C}$; T_m – средняя температура молока, $^\circ\text{C}$; α_1 – коэффициент теплоотдачи от внутренней поверхности трубки теплообменника к нагреваемой среде, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$; α_2 – коэффициент теплоотдачи от пара к внешней поверхности трубки теплообменника, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$.

Note: q_{i1} – heat flow transferred from the inner surface of the heat exchanger tube to the milk, W/m^2 ; q_{l2} – heat flow transferred from the condensing vapor to the outer surface of the heat exchanger tube, W/m^2 ; q_{ic} – heat flow transferred through the wall of the heat exchanger tube, W/m^2 ; T_{C1} – temperature of the inner surface of the heat exchanger tube, $^\circ\text{C}$; T_{C2} – temperature of the outer surface of the heat exchanger tube, $^\circ\text{C}$; T_S – temperature of condensing steam, $^\circ\text{C}$; T_m – average milk temperature, $^\circ\text{C}$; α_1 – heat transfer coefficient from the inner surface of the heat exchanger tube to the heated medium, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$; α_2 – the coefficient of heat transfer from steam to the outer surface of the heat exchanger tube, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$.

Перечисленные тепловые потоки должны быть определены в функции соответствующих температур. Поставленную задачу решили графоаналитическим методом.

Определение теплового потока, передаваемого от внутренней поверхности трубки теплообменника к молоку

В рассматриваемом диапазоне температур молока от 4 до 76 °С зависимости тепловых потоков $q_l = f(\Delta T_1)$, показанные на рисунке 4, являются линейными. Предварительными исследованиями³ установлено, что для определения результирующего теплового потока $q_l = q_{l1} + q_{l2} + q_{lc}$, равного сумме теплового потока передаваемого молоку q_{l1} от пара q_{l2} через стенку теплообменника q_{lc} , разность температур между внутренней поверхностью трубки теплообменника и средней температурой молока ΔT_1 для реализации длительного режима пастеризации при 63–65 °С в течение 30–40 мин должна быть равной 65 °С, для кратковременной пастеризации в течение 15–20 с – $\Delta T_1 \approx 70$ °С, для высокотемпературной при 85–90 °С без выдержки – $\Delta T_1 \approx 75$ °С. В связи с указанным для определения $q_{l1} = f(\Delta T_1)$ приняли разность температур между внутренней поверхностью трубки теплообменника и средней температурой молока $\Delta T_1 = 65,70$ и 75 °С.

Тогда $T_{c1} = \Delta T_1 - T_m = 105,110$ и 115 °С.

При средней температуре нагреваемого молока $T_m = (T_{in} + T_{out})/2 = 40$ °С молоко имеет следующие параметры: плотность $\rho = 1\,020$ кг/м³, удельная теплоемкость $c = 3,96$ кДж/(кг·°С) = 1,16 (Вт·ч)/(кг·°С), теплопроводность $\lambda_{m1} = 0,564$ Вт/(кг·°С), кинематическая вязкость $\nu = 1,02 \cdot 10^{-6}$ м²/с, динамическая вязкость $\mu = \nu\rho = 0,00104$ Па·с, число Прандтля $Pr = 7,29$.

В этом случае число Рейнольдса определяли в соответствии с известным в теории теплоотдачи при вынужденном движении жидкости в трубе выражением:

$$Re_{m1} = \frac{4G_1}{\pi d_{1avr} \cdot 10^{-3} \cdot 3\,600\mu} = 1,173 \cdot 10^4$$

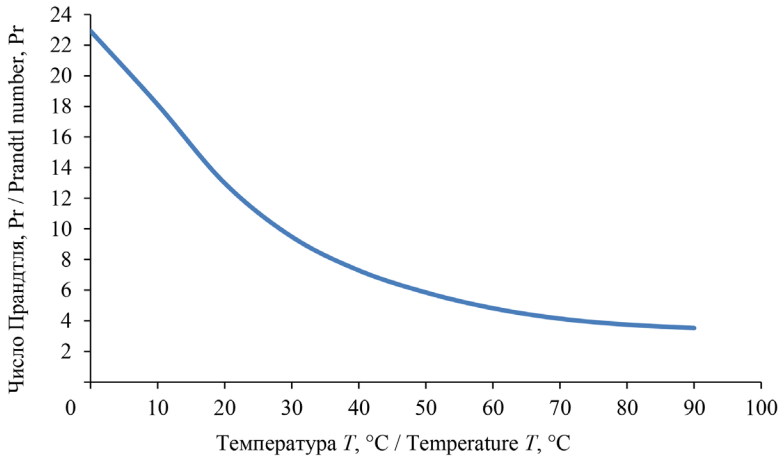
где G_1 – расход нагреваемой среды, м³/ч.

Режим течения молока турбулентный. Тогда при $T_{c1} = 105$ °С и $\Delta T_1 = 65$ °С число Нуссельта определяли по формуле

$$Nu_{m1} = 0,021 \cdot Re_{m1}^{0,8} \cdot Pr_{m1}^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_{m1}}{Pr_C} \right)^{0,25} = 106,47,$$

где индексы « $m1$ » и « C » означают, что физические свойства жидкости выбираются соответственно по среднеарифметической температуре молока T_m и температуре стенки теплообменника T_{c1} . Для молока в общем случае число Прандтля определяли расчетным путем по известным значениям плотности, теплоемкости, кинематической вязкости, теплопроводности и характеру течения молока [2]. В первом приближении предельное значение числа Прандтля для молока известно только для граничной температуры 90 °С и равно $Pr_C = 3,53$ (рис. 5), которое в дальнейшем использовали при определении чисел Нуссельта и α_1 для $T_{c1} = 105,110 \cdot 115$ °С.

³ Краснощекоев Е.А., Сукомел А.С. Задачник по теплопередаче: учеб. пособие для вузов. М.: Энергия; 1980. 288 с.



Р и с. 5. Зависимость числа Pr молока от температуры T , °C
 F i g. 5. Dependence of the Pr number of milk on the temperature T , °C

Источник: рисунок 5 составлен авторами статьи по данным источника⁴.
Source: figure 5 is compiled by the authors of the article based on the source data⁴.

Коэффициент теплоотдачи α_1 , Вт/(м²·с)

$$\alpha_1 = Nu_{m1} \frac{\lambda_{m1}}{d_{1avr}} = 4\,140,$$

и тепловой поток, передаваемый от внутренней поверхности трубки теплообменника к молоку q_{1l} , Вт/м, при $T_{C1} = 105$ °C

$$q_{1l} = \alpha_1 \Delta T_1 \pi d_{1avr} = 12\,252,12.$$

При $T_{C1} = 110$ °C, $\Delta T_1 = 70$ °C, $\alpha_1 = 4\,140$ Вт/(м²·с), $Nu_{m1} = 106,47$:

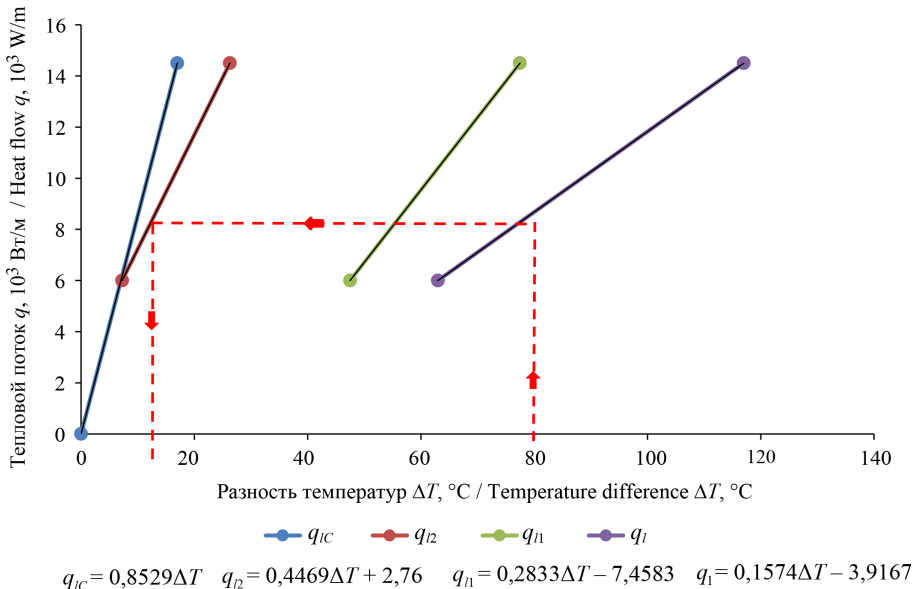
$$q_{1l} = \alpha_1 \Delta T_1 \pi d_{1avr} = 13\,194,594.$$

При $T_{C1} = 115$ °C, $\Delta T_1 = 75$ °C, $\alpha_1 = 4\,140$ Вт/(м²·с), $Nu_{m1} = 106,47$:

$$q_{1l} = \alpha_1 \Delta T_1 \pi d_{1avr} = 14\,137,065.$$

Соответствующая зависимость $q_{1l} = f(\Delta T_1)$ показана на рисунке 6.

⁴ Плотность молока, его удельная теплоемкость и другие физические свойства [Электронный ресурс]. Thermalinfo.ru: сайт. URL: <http://thermalinfo.ru/svoystva-produktov/molochnye-produkty/svoystva-moloka-plotnost-vyazkost-teploprovodnost-i-teploemkost> (дата обращения: 10.07.2025).



Р и с. 6. Зависимости составляющих тепловых потоков от разностей температур
 F i g. 6. Dependences of heat flow components on temperature differences

Примечание: q_1 – результирующий тепловой поток, Вт/м²; ΔT – разность температур, °С.
Note: q_1 – the resulting heat flow, W/m²; ΔT – temperature difference, °C.

Источник: рисунок 6 составлен авторами статьи в программе Microsoft Excel.
Source: figure 6 is compiled by the authors of the article using the program Microsoft Excel.

Определение теплового потока q_{1C} , передаваемого через стенку трубки теплообменника

Теплопроводность нержавеющей стали AISI-304 $\lambda_{\text{AISI}} = 16,2 \dots 16,3$ Вт/(м·град) принимается независимой от температуры $\lambda_{\text{AISI}} \neq f(\Delta T_C)$. В связи с этим функция $q_{1C} = f(\Delta T_C)$ является линейной, и тепловой поток q_{1C} , Вт/м, при $\Delta T_C = (T_{C2} - T_{C1}) = 2^\circ\text{C}$ принял значение

$$q_{1C} = (T_{C2} - T_{C1}) \frac{2\pi\lambda_{\text{AISI}}}{2,3 \lg \frac{d_{2avr}}{d_{1avr}}} = 1575,75.$$

Зависимость $q_{1C} = f(\Delta T_C)$ приведена на рисунке 6.

Определение теплового потока q_{12} , передаваемого от конденсирующегося пара к внешней поверхности трубки теплообменника

Витки змеевикового теплообменника рассматривали как горизонтальные трубы, а режим конденсации пара считался пленочным. В этом случае зависимость $q_{12} = f(\Delta T_{C2})$ находилась с использованием известной формулы Д. А. Лабунцова для коэффициента теплоотдачи от конденсирующегося пара к стенке трубки теплообменника

$$\alpha_2 = 3,25 \frac{A^{0,75}}{B} \cdot \frac{1}{\left(\pi \frac{d_{2avr}}{2} \Delta T_{C2} \right)^{0,25}}, \quad (1)$$

где A и B – комплексы, зависящие от температуры паровой фазы. Тогда тепловой поток 1 м

$$q_{l2} = \alpha_2 \pi d_{2avr} \Delta T_{C2} = 3,25 \frac{A^{0,75}}{B} \cdot \frac{2\pi \frac{d_{2avr}}{2} \Delta T_{C2}}{\left(\pi \frac{d_{2avr}}{2} \Delta T_{C2} \right)^{0,25}} = 6,5 \frac{\left(\pi A \frac{d_{2avr}}{2} \Delta T_{C2} \right)^{0,75}}{B}. \quad (2)$$

При $p = 2,02 \cdot 10^5$ Па и $T_S = 120$ °С значения комплексов A и B для воды⁵ принимали $A = 70,31$ (м·град), $B = 7,65 \cdot 10^{-3}$ м/Вт.

Следовательно, в соответствии с выражением (2),

$$q_{l2} = 1\,330,38 \cdot \Delta T_{C2}^{0,75}. \quad (3)$$

Задавшись $\Delta T_{C2} = 10,15$ и 20 °С, получили соответственно $q_{l2}^{10^\circ\text{C}} = 7\,476,73$ Вт/м; $q_{l2}^{15^\circ\text{C}} = 10\,137,49$ Вт/м; $q_{l2}^{20^\circ\text{C}} = 12\,581,4$ Вт/м.

Зависимость $q_{l2} = f(\Delta T_{C2})$ приведена на рисунке 6.

Зависимость результирующего теплового потока от суммарного теплового напора

$\Delta T = T_S - T_m$ нашли путем суммирования найденных выше трех зависимостей q_{l1} , q_{lC} и q_{l2} . Результирующий тепловой поток $q_l = f(T_S - T_m)$ показан на рисунке 6.

Отложив по оси абсцисс заданное значение общего температурного напора $\Delta T = T_S - T_m = 120 - 40 = 80$ °С и проведя вертикаль до пересечения с кривой $q_l = f(T_S - T_m)$, на оси ординат нашли искомое значение теплового потока (рис. 6): $q_l = 9\,300$ Вт/м.

Определение расхода конденсата

При $T_S = 120$ °С теплота парообразования $r = 2\,202,8$ кДж/кг, тогда расход конденсата на 1 м длины трубки змеевикового теплообменника G_1 , кг/(м·ч):

$$G_1 = \frac{q_l}{r} 3\,600 = 15,19. \quad (4)$$

Коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·°С)

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_w}{\lambda_{AISI}} + \frac{1}{\alpha_2}} = 2\,873,56, \quad (5)$$

где α_1 – коэффициент теплоотдачи от внутренней поверхности трубки теплообменника к молоку, $\alpha_1 = 4\,140$ Вт/(м²·с); α_2 – коэффициент теплоотдачи

⁵ Лабунцов Д.А. Теплоотдача при пленочной конденсации чистых паров на вертикальных поверхностях и горизонтальных трубах. М.: Издательство МЭИ; 2000. 388 с.

от конденсирующегося пара ко внешней поверхности трубки теплообменника; δ_w – толщина стенки трубки змеевикового теплообменника, $\delta_w = 1 \cdot 10^{-3}$ м.

В формуле (5) коэффициент теплоотдачи $\alpha_2 = 207,09 \cdot 10^3$ Вт/(м² · с) определяли по формуле (1), в которой при $p = 2,02 \cdot 10^5$ Па и $T_s = 120$ °С значения комплексов для воды принимают $A = 70,3$ 1/(м · град), $B = 7,65 \cdot 10^{-3}$ м/Вт. При заданном значении общего температурного напора $\Delta T = T_s - T_m = 120 - 40 = 80$ °С температурный напор $\Delta T_{C2} = 14$ °С определяли с использованием зависимости $q_{12} = f(\Delta T_{C2})$, (рис. 6).

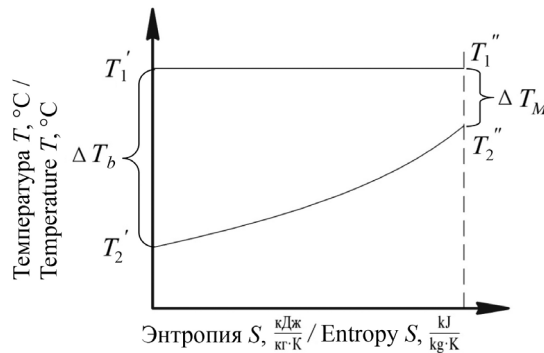
Тепловой поток Q для нагрева молока, Вт, удельная теплоемкость которого $c = 3,96$ кДж/(кг · град) = 1,16 Вт/(кг · град) с начальной температурой на входе в теплообменник $T_{in} = 4$ °С, конечной на выходе $T_{out} = 76$ °С и расходом $G_1 = 8,3 \cdot 10^{-3}$ м³/мин = 498 кг/ч \approx 500 кг/ч определяли по формуле Ньютона:

$$Q = G_1 c (T_{out} - T_{in}) = 41\,760. \quad (6)$$

Средняя логарифмическая разность температур теплоносителей при конденсации пара:

$$\Delta T_{sr} = \frac{\Delta T_b - \Delta T_{min}}{2,3 \lg \frac{\Delta T_b}{\Delta T_{min}}} = 74,71, \quad (7)$$

где $\Delta T_b = T_1' - T_2' = 120 - 4 = 116$ °С и $\Delta T_{min} = T_1'' - T_2'' = 120 - 76 = 44$ °С определяли по T - S диаграмме на рисунке 7.



Р и с. 7. T - S диаграмма изменения температуры теплоносителей при конденсации пара

F i g. 7. T - S diagram of heat carrier temperature change during steam condensation

Источник: рисунок 7 составлен авторами статьи по данным источника⁶.

Source: figure 7 is compiled by the authors of the article based on the source data⁶.

⁶ Богословский В.Н., Поз М.Я. Теплофизика аппаратов утилизации тепла систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. М.: Стройиздат, 1983. 320 с.

Необходимая площадь нагрева F , м² с использованием результатов расчетов по формулам (5)–(7)

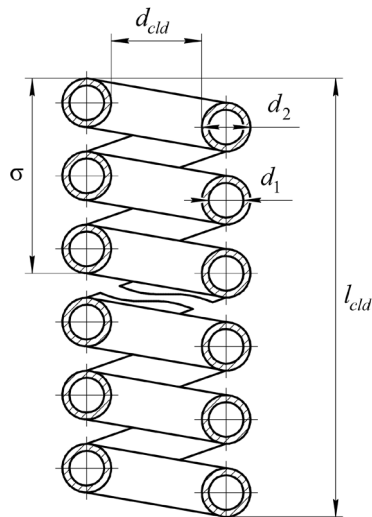
$$F = \frac{Q}{k\Delta T_{avr}} = 0,19.$$

Длина трубки змеевикового теплообменника l , м

$$l = \frac{F}{\pi d_{2avr}} = 3,75.$$

Если внутренний диаметр воображаемого цилиндра, образованного внутренними поверхностями витков змеевикового теплообменника, равен $d_{cld} = 0,056$ м, то длина окружности внешней поверхности этого цилиндра равна $L = \pi d_{cld} = 0,176$ м, а число витков теплообменника, выполненного из трубки нержавеющей стали AISI-304, равно $n = l/L = 21,3$.

На рисунке 8 представлены геометрические размеры трех витков, высота которых с учетом воздушного зазора составила $\sigma = 0,05$ м.



Р и с. 8. Геометрические размеры элемента змеевикового теплообменника из 3 витков
F i g. 8. Geometric dimensions of a coil heat exchanger element with 3 coils

Примечание: σ – высота теплообменника из трех витков, м; d_{cld} – внутренний диаметр цилиндра теплообменника, м; l_{cld} – высота теплообменника, м.

Note: σ – the height of the three-coil heat exchanger, m; d_{cld} – the inner diameter of the heat exchanger cylinder, m; l_{cld} – height of the heat exchanger, m.

Тогда высота змеевикового теплообменника с числом витков $n = l/L = 21,3$, выполненного из трубки AISI-304 средним внешним диаметром $d_{2avr} = 0,0165$ м и длиной $l = 3,75$ м, составила $l_{cld} = 0,35$ м, что значительно повысило компактность устройства.

Суммарный расход конденсата G_{Σ} , кг/м с учетом выражения (4)

$$G_{\Sigma} = G_1 l = 56,96.$$

Расход пара, кг/ч

$$D = \frac{Q}{(i_{ist} - i_{cnd})\eta} = 71,78,$$

где Q – тепловой поток для нагрева молока, определяемый по формуле (6), $Q = 41\,760$ Вт; i_{ist} – энтальпия пара при температуре $120\text{ }^{\circ}\text{C}$, $i_{ist} = 646,4$ ккал/кг = $2\,708,416$ кДж/кг = $752,34$ Вт·ч/кг; i_{cnd} – энтальпия конденсата при температуре $120\text{ }^{\circ}\text{C}$, $i_{cnd} = 120,3$ ккал/кг = $504,057$ кДж/кг = 140 Вт·ч/кг; η – КПД, $\eta = 0,95$.

Мощность электродного парогенератора P , Вт:

– в разомкнутом цикле с использованием внешней питательной воды

$$P = \frac{D(i_{ist} - i_{fw})}{\eta} = 55\,083,2, \quad (8)$$

где i_{fw} – энтальпия питательной воды в разомкнутом цикле, например, при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $i_{fw} = 20,04$ ккал/кг = $83,96$ кДж/кг = $23,32$ Вт·ч/кг.

– в замкнутом цикле без использования внешней питательной воды

$$P = \frac{D(i_{ist} - i_{fw})}{\eta} = \frac{D(i_{ist} - i_{cnd})}{\eta} = 46\,267,12, \quad (9)$$

где $i_{fw} = i_{cnd}$.

Коэффициент полезного действия в разомкнутом цикле $\eta = Q/P = 0,758$, в замкнутом цикле $\eta = 0,9$.

Сравнение результатов расчета по формулам (8) и (9) свидетельствует о том, что использование замкнутого термосифонного цикла обеспечивает снижение мощности и коэффициента полезного действия на 16 %.

Определение геометрических размеров плоскопараллельной электродной системы

Схема рассчитываемой электродной системы представлена на рисунке 9.

Сопротивление воды в межэлектродном пространстве R , Ом:

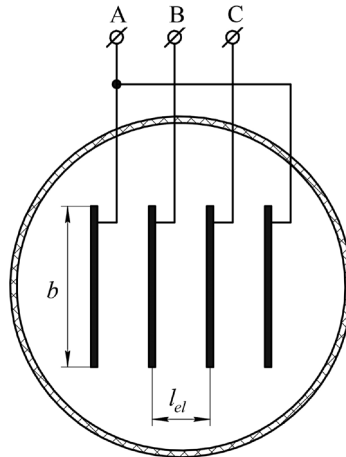
$$R = \frac{(n-1)U^2}{P} = 9,36,$$

где U – напряжение, $U = 380$ В; P – мощность, $P = 46\,267,12$ Вт; n – число электродов, $n = 4$.

Расстояние между электродами l_{el} , м:

$$l_{el} = \frac{U}{E_{apb}} = 2,53 \cdot 10^{-2},$$

где E_{apb} – допустимая напряженность электрического поля в межэлектродном пространстве, $E_{apb} = 150 \cdot 10^2$ В/м.



Р и с. 9. Схема плоскопараллельной электродной системы парогенератора
 Fig. 9. Scheme of a flat-parallel electrode system of a steam generator

Примечание: b – ширина электродов, м; l_{el} – межэлектродное расстояние, м.
 Note: b – width of the electrodes, m; l_{el} – interelectrode distance, m.

Проводимость воды в межэлектродном пространстве σ , Ом⁻¹·м⁻¹

$$\sigma = 1,9 \cdot 10^{-4} \cdot x,$$

где x – солесодержание, например $x = 2$ мг/кг.

Тогда удельное электрическое сопротивление воды межэлектродном пространстве $\rho = 1/\sigma = 264 \cdot 10^{-2}$ Ом·м.

Удельное сопротивление пароводяной смеси ρ_{mxt} , Ом·м:

$$\rho_{mxt} = 1,5\rho = 396 \cdot 10^{-2}.$$

Высота электродов h , м.

$$h = \frac{l_{el} \rho_{mxt}}{bR} = 10,7 \cdot 10^{-2},$$

где b – ширина электрода, выбираемая из конструктивных соображений, например, $b = 10 \cdot 10^{-2}$ м.

Плотность тока на электродах и проверка по допустимой плотности тока

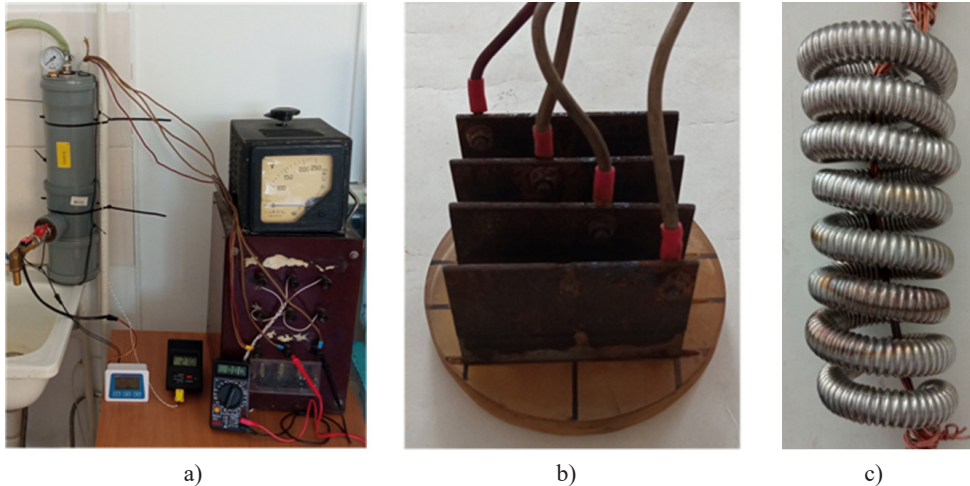
Максимальная плотность тока j_{max} , А/м²:

$$j_{max} = \frac{1,2U}{l_{el} \rho_{mxt}} = 0,45 \cdot 10^4.$$

Полученное значение j_{max} меньше допустимого для плоскопараллельных электродов $j_{apb} = 0,5 \cdot 10^4$ А/м². Таким образом, результат проверки по допустимой плотности тока на электродах соответствует требованиям.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методика использована при проведении серии экспериментальных исследований. Общий вид экспериментальной установки, электродной системы и змеевикового теплообменника представлены на рисунке 10. Электрическая схема показана на рисунке 9.



Р и с. 10. Общий вид:

а) экспериментальная установка; б) электродная система; в) змеевиковый теплообменник

F i g. 10. General view:

a) experimental setup; b) electrode system; c) coil heat exchanger

Источник: фотографии сделаны С. О. Бобровским при проведении измерений в лаборатории Алтайского государственного аграрного университета.

Source: the photos were taken by S. O. Bobrovsky during measurements in the laboratory of the Altai State Agrarian University.

Результаты измерения разности между конечной T_{out} и начальной T_{in} температурами нагрева ΔT , °С, мощности без учета потерь $P_{exc.los.}$, кВт, измеренной мощности P_{EXP} , кВт, средние значения КПД $\bar{\eta}_i$ и величины строчных дисперсий $S_{(\eta)_i}^2$ представлены в таблице. Мощность без учета потерь $P_{exc.los.}$ определяли по формуле (6). Коэффициент полезного действия определяли следующим образом

$$\eta = \frac{P_{exc.los.}}{P_{EXP}}$$

Для расчета строчных дисперсий использовалось выражение $S_{(\eta)_i}^2 = \frac{\sum_{j=1}^n (\eta_{i,j} - \bar{\eta}_i)^2}{n-1}$, где $\sum_{j=1}^n (\eta_{i,j} - \bar{\eta}_i)^2$ представляет собой сумму квадратов ошибок наблюдений.

Среднее значение КПД $\bar{\eta}_i = \frac{\sum_{i=1}^n \eta_i}{3}$, где $\sum_{i=1}^n \eta_i$ – сумма КПД параллельных опытов n , число которых принято равным 3.

Таблица
Table

 Данные для осреднения и оценки воспроизводимости параллельных опытов
 Data for averaging and evaluating the reproducibility of parallel experiments

Разность между конечной T_{out} и начальной T_{in} температурами нагрева, °C / The difference between the final T_{out} and initial heating T_{in} temperatures, °C	Мощность без учета потерь, кВт / Excluding losses, kW	Параллельные значения откликов / Parallel response values						Среднее значение КПД / The average value of the efficiency coefficient	Дисперсия по строкам / Row-by-row variance
		Мощность измеренная, кВт / Measured power, kW			КПД / Efficiency factor				
ΔT	$P_{exc.los.}$	P_{EXP}			$\eta = P_{exc.los.} / P_{EXP}$			$\bar{\eta}_i$	$S^2_{(\eta)_i}$
		P_{EXP1}	P_{EXP2}	P_{EXP3}	η_1	η_2	η_3		
		76	72	47,80	48,360	46,210	0,87		
76	66	46,49	45,388	43,325	0,82	0,84	0,88	0,8466	0,0001
75	60	40,78	41,260	39,386	0,80	0,85	0,88	0,8430	0,0005

Источник: таблица 1 составлена авторами статьи.
 Source: the table 1 was compiled by the authors of the article.

Сумма построчных дисперсий по результатам трех параллельных опытов составляет $\sum_{i=1}^3 S^2_{(\eta)_i} = 0,015$.

Максимальное значение построчной дисперсии $S^2_{(\eta)_i, \max} = 0,001$.

Тогда фактическое значение критерия Кохрена $G = \frac{S^2_{(\eta)_i, \max}}{\sum_{i=1}^3 S^2_{(\eta)_i}} = 0,66$.

При числе степеней свободы $m_1 = n - 1 = 2$, где n – число параллельных опытов; m_2 – число строк эксперимента, $m_2 = 3$, табличное значение критерия Кохрена $G_{tab} = 0,8709$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$.

Полученное значение G -критерия 0,66 не превышает табличного значения, следовательно, гипотеза об однородности построчных дисперсий принимается не противоречащей опытными данным.

Общая дисперсия воспроизводимости: $S^2_{(\eta)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S^2_{(\eta)_i} = 0,0005$, где $N = m_2 = 3$.

ОБСУЖДЕНИЕ

Методика расчета электродного термосифонного проточного пастеризатора молока со змеевиковым теплообменником позволила согласовать геометрические и энергетические характеристики электродной системы с энергетическими, гидро- и термодинамическими параметрами замкнутого термодинамического изохорного цикла, разработать, изготовить и провести ряд экспериментальных исследований при заданных параметрах (расход нагреваемого продукта, его начальная и конечная температура). Адекватность методики подтверждается результатами обработки экспериментальных данных: коэффициент полезного действия при реализации составил от 84 до 88 %, что на 15–16 % превышает аналогичный показатель при реализации традиционных способов нагрева молока в процессе пастеризации. Данный результат с высокой степенью достоверности соответствует ранее опубликованным выводам [20], полученным на основании проведенного энергетического и эксергетического анализа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование показало, что существующие процессы нагрева молока обладают рядом недостатков, связанных с необходимостью нагрева промежуточных теплоносителей в виде воды или пара в разомкнутом термодинамическом цикле, что сопровождается снижением коэффициента полезного действия процесса. Одним из направлений повышения КПД может рассматриваться организация процесса в замкнутом цикле с помощью электродного термосифонного нагревателя, промежуточным теплоносителем в котором является пар, обладающий внутренним энергосодержанием, в 6–7 раз превышающий энтальпию воды при той же температуре. Однако единая методика расчета указанных устройств отсутствовала.

Разработанная методика подразумевает соблюдение энергетического баланса в электродном термосифонном нагревателе молока при реализации замкнутого изохорного термодинамического цикла типа «генерация пара-конденсирующийся пар-нагреваемая среда-конденсат-генерация пара» в установившемся равновесном режиме. Он обеспечивает достижение требуемой конечной температуры нагреваемого продукта на выходе при заданной производительности с наибольшим коэффициентом полезного действия.

Представленная оригинальная методика объединяет ряд ранее разрозненных расчетных процедур термодинамического и электротехнологического характера и позволяет повысить коэффициент полезного действия нагревательного устройства в технологическом процессе пастеризации. Методика подтверждена и обоснована теоретическими, инженерными и экспериментальными средствами.

Практическая значимость исследования заключается в снижении удельных затрат энергии на нагрев молока в процессе термической обработки, в котором электродный термосифонный нагреватель может занять место пастеризатора. Перспективным направлением является исследование процесса саморегулирования мощности электродного генератора пара в установившемся равновесном режиме теплообмена в зависимости от температуры молока. Этого можно достичь посредством использования компенсационной емкости при корректировке температуры,

давления и объема паровой фазы с соответствующей регулировкой уровня первичного электролита в межэлектродном пространстве при изменении расхода и температуры молока, поступающего в пастеризатор из секций рекуперации и сепарирования пастеризационной установки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mahmoud M.Z., Davidson R., Abdelbasset W.K., Fagiry M.A. The New Achievements in Ultrasonic Processing of Milk and Dairy Products. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*. 2022;15(1):199–205. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2022.03.005>
2. Антипов С.Т., Жучков А.В., Овсянников В.Ю., Бабенко М.С. математическое моделирование процесса инфракрасной пастеризации молока. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. 2013;(4):67–72. URL: <https://www.vestnik-vsuet.ru/vguit/article/view/534> (дата обращения: 16.07.2025).
3. Ansari J.A., Ismail M., Farid M. Extension of Shelf Life of Pasteurized Trim Milk Using Ultraviolet Treatment. *Journal of Food Safety*. 2020;40(2):e12768. <https://doi.org/10.1111/jfs.12768>
4. Рязанцева К.А., Шерстнева Н.Е. Традиционные и инновационные способы применения ультрафиолетового излучения в молочной промышленности. *Техника и технология пищевых производств*. 2022;52(2):390–406. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-2-2372>
5. Setiawan B., Wakidah R.N., Yulianto Y. Reflective Array Solar Water Heater for Milk Pasteurization. *Journal of Environmental Research, Engineering and Management*. 2020;76(4):131–137. <https://doi.org/10.5755/j01.ere.m.76.4.24411>
6. Tigabe S., Bekele A., Pandey V. Performance Analysis of the Milk Pasteurization Process Using a Flat Plate Solar Collector. *Journal of Engineering*. 2022;(1):6214470. <https://doi.org/10.1155/2022/6214470>
7. Al-Hilphy A.R.S., Ali H.I. Milk Flash Pasteurization by the Microwave and Study its Chemical, Microbiological and Thermo Physical Characteristics. *Journal of Food Processing & Technology*. 2013;4(7):1000250. URL: <https://www.walshmedicalmedia.com/open-access/milk-flash-pasteurization-by-the-microwave-and-study-its-chemical-microbiological-and-thermo-physical-characteristics-33229.html> (дата обращения: 24.07.2025).
8. Roy J., Latif U.I., Mujnibeen M.S.A., Kabir M.S., Islam M.I., Alam K.S. Effect of Microwave Heat Treatment on the Quality of Milk. *International Journal of Recent Scientific Research*. 2017;8(9):19766–19771. URL: <https://www.recentscientific.com/effect-microwave-heat-treatment-quality-milk> (дата обращения: 24.07.2025).
9. Al-Hilphy A.R.S. Designing and Manufacturing of a Non Thermal Milk Pasteurizer Using Electrical Field. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*. 2013;8(3):204–211. <https://doi.org/10.3844/ajabssp.2013.204.211>
10. Shabbir M.A., Ahmed H., Maan A.A., Rehman A., Afraz M.T., Iqbal M.W. и др. Effect of Non-Thermal Processing Techniques on Pathogenic and Spoilage Microorganisms of Milk and Milk Products. *Food Science and Technology*. 2021;41(2):279–294. <https://doi.org/10.1590/fst.05820>
11. Tay T.T., Chua Y.L. High Temperature Short Time (HTST) Camel Milk Pasteurization Pilot Plant. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2015;10(15):6241–6245. URL: http://www.arpnjournals.com/jeas/volume_15_2015.htm (дата обращения: 16.07.2025).
12. Gana I.M. Design, Fabrication and Testing of Soya Milk Production and Pasteurization Mini Plant. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. 2017;19(4):45–53. URL: <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/issue/archive> (дата обращения: 16.07.2025).
13. Başaran A., Yilmaz T., Çivi C. Energy and Exergy Analysis of Induction-Assisted Batch Processing in Food Production: a Case Study – Strawberry Jam Production. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2020;(140):1871–1882. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08931-0>
14. Başaran A., Yilmaz T., Azgın S.T., Çivi C. Comparison of Drinking Milk Production with Conventional and Novel Inductive Heating in Pasteurization in Terms of Energetic, Exergetic,

- Economic And Environmental Aspects. *Journal of Cleaner Production*. 2021;(317):128280. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128280>
15. Razak A.R.A., Ibrahim N.M., Rahman A.S.F., Fayzul M., Azizan M.M., Hashim U. и др. Induction Heating as Cleaner Alternative Approach in Food Processing Industry. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;(1878):012053. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1878/1/012053>
 16. Wu S., Yang N., Jin Y., Li D., Xu Y., Xu X. и др. Development of an Innovative Induction Heating Technique for the Treatment of Liquid Food: Principle, Experimental Validation and Application. *Journal of Food Engineering*. 2020;(271):109780. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109780>
 17. Соловьев С.В., Морозов В.В., Радкевич Е.В., Карташов Л.П., Макаровская З.В. Обоснование параметров конструктивных элементов индукционного нагревателя для пастеризации молока в потоке. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2019;1(75):100–103. URL: <https://orensau.ru/ru/nauka/izvestiya-orenburgskogo-gau> (дата обращения: 03.08.2025).
 18. Неверов Е.Н., Владимиров А.А., Коротких П.С., Николаева Е.В., Порохнов А.Н. *Инженерные технологии и системы*. 2024;34(1):128–144. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202401.128-144>
 19. Багаев А.А., Бобровский С.О. Методика расчета, оценка энергетической эффективности и направления совершенствования низкотемпературных индукционных коаксиальных нагревателей молока промышленной частоты. *Вестник НГИЭИ*. 2023;(7):60–71. <https://www.elibrary.ru/ydscvr>
 20. Bagaev A.A., Bobrovskiy S.O. Electrotechnological Heat Treatment of Milk: Energy and Exergy Efficiency. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2023;53(2):272–278. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-2-2428>
 21. Багаев А.А., Бобровский С.О., Левин А.М. Нагреватель жидкости. Патент 2791097 С1 Российская Федерация. 2 марта 2023. <https://elibrary.ru/vlzdf1>
 22. Багаев А.А., Багаев А.И. Нагреватель текучей среды. Патент 2156411 С1 Российская Федерация. 20 сентября 2000. <https://www.elibrary.ru/fbzvrx>

REFERENCES

1. Mahmoud M.Z., Davidson R., Abdelbasset W.K., Fagiry M.A. The New Achievements in Ultrasonic Processing of Milk and Dairy Products. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*. 2022;15(1):199–205. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2022.03.005>
2. Antipov S.T., Zhuchkov A.V., Ovsyannikov B.Yu., Babenko M.S. Mathematical Modeling of Infrared Milk Pasteurization. *Vestnik Voronežskogo gosudarstvennogo universiteta inženernyh tehnologij*. 2013;(4):67–72. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://www.vestnik-vsuet.ru/vguit/article/view/534> (accessed 16.07.2025).
3. Ansari J.A., Ismail M., Farid M. Extension of Shelf Life of Pasteurized Trim Milk Using Ultraviolet Treatment. *Journal of Food Safety*. 2020;40(2):e12768. <https://doi.org/10.1111/jfs.12768>
4. Riazantseva K.A., Sherstneva N.E. Traditional and Innovative Uses of Ultraviolet Treatment in the Dairy Industry. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2022;52(2):390–406. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-2-2372>
5. Setiawan B., Wakidah R.N., Yulianto Y. Reflective Array Solar Water Heater for Milk Pasteurization. *Journal of Environmental Research, Engineering and Management*. 2020;76(4):131–137. <https://doi.org/10.5755/j01.erem.76.4.24411>
6. Tigabe S., Bekele A., Pandey V. Performance Analysis of the Milk Pasteurization Process Using a Flat Plate Solar Collector. *Journal of Engineering*. 2022;(1):6214470. <https://doi.org/10.1155/2022/6214470>
7. Al-Hilphy A.R.S., Ali H.I. Milk Flash Pasteurization by the Microwave and Study its Chemical, Microbiological and Thermo Physical Characteristics. *Journal of Food Processing & Technology*. 2013;4(7):1000250. Available at: <https://www.walshmedicalmedia.com/open-access/milk-flash-pasteurization-by-the-microwave-and-study-its-chemical-microbiological-and-thermo-physical-characteristics-33229.html> (accessed 24.07.2025).

8. Roy J., Latif U.I., Mujnibeen M.S.A., Kabir M.S., Islam M.I., Alam K.S. Effect of Microwave Heat Treatment on the Quality of Milk. *International Journal of Recent Scientific Research*. 2017;8(9):19766–19771. Available at: <https://www.recentscientific.com/effect-microwave-heat-treatment-quality-milk> (accessed 24.07.2025).
9. Al-Hilphy A.R.S. Designing and Manufacturing of a Non Thermal Milk Pasteurizer Using Electrical Field. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*. 2013;8(3):204–211. <https://doi.org/10.3844/ajabssp.2013.204.211>
10. Shabbir M.A., Ahmed H., Maan A.A., Rehman A., Afraz M.T., Iqbal M.W., et al. Effect of Non-Thermal Processing Techniques on Pathogenic and Spoilage Microorganisms of Milk and Milk Products. *Food Science and Technology*. 2021;41(2):279–294. <https://doi.org/10.1590/fst.05820>
11. Tay T.T., Chua Y.L. High Temperature Short Time (HTST) Camel Milk Pasteurization Pilot Plant. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2015;10(15):6241–6245. Available at: http://www.arpnjournals.com/jeas/volume_15_2015.htm (accessed 16.07.2025).
12. Gana I.M. Design, Fabrication and Testing of Soya Milk Production and Pasteurization Mini Plant. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. 2017;19(4):45–53. Available at: <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/issue/archive> (accessed 16.07.2025).
13. Başaran A., Yilmaz T., Çivi C. Energy and Exergy Analysis of Induction-Assisted Batch Processing in Food Production: a Case Study – Strawberry Jam Production. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2020;(140):1871–1882. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08931-0>
14. Başaran A., Yilmaz T., Azgın S.T., Çivi C. Comparison of Drinking Milk Production with Conventional and Novel Inductive Heating in Pasteurization in Terms of Energetic, Exergetic, Economic And Environmental Aspects. *Journal of Cleaner Production*. 2021;(317):128280. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128280>
15. Razak A.R.A., Ibrahim N.M., Rahman A.S.F., Fayzul M., Azizan M.M., Hashim U., et al. Induction Heating as Cleaner Alternative Approach in Food Processing Industry. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;(1878):012053. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1878/1/012053>
16. Wu S., Yang N., Jin Y., Li D., Xu Y., Xu X., et al. Development of an Innovative Induction Heating Technique for the Treatment of Liquid Food: Principle, Experimental Validation and Application. *Journal of Food Engineering*. 2020;(271):109780. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109780>
17. Soloviev S.V., Morozov V.V., Radkevich E.V., Kartashov L.P., Makarovskaya Z.V. Rationale of Parameters of Constructive Elements of an Induction Heater for Pasteurizing Milk in a Stream. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2019;(1):100–103. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://orensau.ru/ru/nauka/izvestiya-orenburgskogo-gau> (accessed 03.08.2025).
18. Neverov E.N., Vladimirov A.A., Korotkih P.S., Nikolaeva E.V., Porokhnov A.N. Scientific and Technical Basis for the Development of an Induction Heating Unit for Milk Pasteurization. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(1):128–144. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202401.128-144>
19. Bagaev A.A., Bobrovsky S.O. Low-Temperature Induction Coaxial Milk Heaters of Industrial Frequency: Calculation Methodology, Assessment of Energy Efficiency and Areas of Improvement. *Bulletin NGIEI*. 2023;(7):60–71. (In Russ., abstract in Eng.) <https://www.elibrary.ru/ydscvr>
20. Bagaev A.A., Bobrovskiy S.O. Electrotechnological Heat Treatment of Milk: Energy and Exergy Efficiency. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2023;53(2):272–278. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-2-2428>
21. Bagaev A.A., Bobrovsky S.O., Levin A.M. Liquid Heater. Patent 2791097 C1 Russian Federation. 2023 March 2. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/vlzdf1>
22. Bagaev A.A., Bagaev A.I. Fluid Heater. Patent 2156411 C1 Russian Federation. 2000 September 20. (In Russ., abstract in Eng.) <https://www.elibrary.ru/fbzvrx>

Об авторах:

Багаев Андрей Алексеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электрификации и автоматизации сельского хозяйства Алтайского государственного аграрного университета (656049, Российская Федерация, г. Барнаул, пр. Красноармейский, д. 98),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2586-2590>, Scopus ID: 57205438220, SPIN-код: 7421-2807, BAGAEV710@mail.ru

Бобровский Сергей Олегович, старший преподаватель кафедры электрификации и автоматизации сельского хозяйства Алтайского государственного аграрного университета (656049, Российская Федерация, г. Барнаул, пр. Красноармейский, д. 98), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9243-0179>, Scopus ID: 58608530600, SPIN-код: 5222-6537, sergej.bobrovskij.95@mail.ru

Вклад авторов:

А. А. Багаев – формулирование идеи исследования, целей и задач; разработка методологии исследования; деятельность по аннотированию (созданию метаданных), очистке данных и поддержанию их целостности для первоначального и повторного использования; административное управление планированием и проведением исследования; контроль, лидерство и наставничество в процессе планирования и проведения исследования; проверка воспроизводимости результатов экспериментов и исследования в рамках основных или дополнительных задач работы; создание и подготовка рукописи: критический анализ черновика рукописи, внесение замечаний и исправлений членами исследовательской группы, в том числе на этапах до и после публикации.

С. О. Бобровский – деятельность по аннотированию (созданию метаданных), очистке данных и поддержанию их целостности для первоначального и повторного использования; создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования и полученных данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила в редакцию 10.11.2025; поступила после рецензирования 25.12.2025; принята к публикации 20.01.2026

About the authors:

Andrey A. Bagaev, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Electrification and Automation of Agriculture, Altai State Agrarian University (98 Krasnoarmeysky Ave., Barnaul 656049, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2586-2590>, Scopus ID: 57205438220, SPIN-code: 7421-2807, BAGAEV710@mail.ru

Sergey O. Bobrovsky, Senior Lecturer at the Department of Electrification and Automation of Agriculture, Altai State Agrarian University (98 Krasnoarmeysky Ave., Barnaul 656049, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9243-0179>, Scopus ID: 58608530600, SPIN-code: 5222-6537, sergej.bobrovskij.95@mail.ru

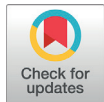
Authors contribution:

A. A. Bagaev – ideas; formulation or evolution of overarching research goals and aims; development or design of methodology; creation of models; management activities to annotate (produce metadata), scrub data and maintain research data (including software code, where it is necessary for interpreting the data itself) for initial use and later re-use; oversight and leadership responsibility for the research activity planning and execution, including mentorship external to the core team; verification, whether as a part of the activity or separate, of the overall replication / reproducibility of results / experiments and other research outputs; preparation, creation and / or presentation of the published work by those from the original research group, specifically critical review, commentary or revision – including pre- or post-publication stages.


S. O. Bobrovsky – management activities to annotate (produce metadata), scrub data and maintain research data (including software code, where it is necessary for interpreting the data itself) for initial use and later re-use; preparation, creation and / or presentation of the published work, specifically writing the initial draft (including substantive translation).

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 10.11.2025; revised 25.12.2025; accepted 20.01.2026

**МАШИНОСТРОЕНИЕ /
MECHANICAL ENGINEERING**<https://doi.org/10.15507/2658-4123.26362.392-415>EDN: <https://elibrary.ru/usrogr>

УДК / UDK 621.436.1

*Оригинальная статья / Original article***Снижение дымности и сажеобразования
в дизельном двигателе при полном замещении
нефтяного топлива метанолом и метиловым
эфиром рапсового масла****В. А. Лиханов, О. П. Лопатин** *Вятский государственный агротехнологический университет,
г. Киров, Российская Федерация* *nirs_vsaa@mail.ru**Аннотация*

Введение. Характеристики дизельного топлива, включая его химический состав и физико-химические свойства, напрямую коррелируют с экологическими аспектами работы двигателя. Они определяют интенсивность образования сажи в процессе сгорания и объем ее выбросов в атмосферу с отработавшими газами. При эксплуатации двигателя с альтернативным биотопливом на разных нагрузочных и скоростных режимах условия горения топлива в цилиндре дизеля изменяются в зависимости от параметров впрыскивания и распыливания, размера капель, что приводит к модификации характеристик сажевыделения. Актуальность научного исследования процесса сажеобразования в дизельных двигателях, работающих на биотопливе, обусловлена его непосредственным влиянием на эффективность сгорания, уровень токсичных выбросов, а также на экономические и экологические характеристики двигателя.

Цель исследования. Изучить влияние метанола и метилового эфира рапсового масла на образование сажи и уменьшение дымности отработавших газов дизельного двигателя.

Материалы и методы. Адекватность и современность методов обработки опытных данных подтверждается экспериментальными исследованиями и аналитическими зависимостями. Экспериментальные исследования проводились в соответствии с ГОСТ 18509-88, отбор проб для определения дымности отработавших газов – ГОСТ 24028-2013, ГОСТ 17.2.2.02-98, ГОСТ Р 41.24-2003. Показатели процесса сгорания определялись по методике Центрального научно-исследовательского дизельного института, расчетные характеристики сажи по методике Центрального научно-исследовательского дизельного института, Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого и программам Вятского государственного агротехнологического университета.

© Лиханов В. А., Лопатин О. П., 2026

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

Результаты исследования. Изучена морфология и микроструктура агрегатных сажевых частиц. Рассмотрены физико-химические характеристики применяемых в дизельном двигателе топлив. На основных эксплуатационных нагрузочных и скоростных режимах дизельного двигателя, работающего на метаноле и метиловом эфире рапсового масла, получены значения дымности отработавших газов, определены температуры в зонах образования и выгорания сажи, количество и диаметр частиц сажи, массовое содержание и концентрация сажи. Получены их максимальные значения с определением соответствующего им угла поворота коленчатого вала. Успешно осуществлено полное замещение стандартного нефтяного дизельного топлива в дизельных двигателях метанолом и метиловым эфиром рапсового масла.

Обсуждение и заключение. Подтверждается возможность полного замещения штатного топлива в дизельном двигателе метанолом и метиловым эфиром рапсового масла с существенным снижением дымности отработавших газов. Полученные расчетные значения концентрации сажи в цилиндре соответствуют актуальным теоретическим моделям, описывающим процессы внутри цилиндра, и находят подтверждение в экспериментальных данных по измерению дымности отработавших газов. Дальнейшие направления исследований могут включать адаптацию используемого альтернативного топлива и оптимизацию системы топливоподачи дизельного двигателя для достижения минимально возможного уровня дымности отработавших газов.

Ключевые слова: сажеобразование, частицы сажи, дымность отработавших газов, дизельный двигатель, метанол, метиловый эфир рапсового масла

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Лиханов В.А., Лопатин О.П. Снижение дымности и сажеобразования в дизельном двигателе при полном замещении нефтяного топлива метанолом и метиловым эфиром рапсового масла. *Инженерные технологии и системы.* 2026;36(2):392–415. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.26362.392-415>

Reduction of Smoke and Soot Formation in a Diesel Engine by Replacing Completely Petroleum Fuel with Methanol and Methyl Ester of Rapeseed Oil

V. A. Likhanov, O. P. Lopatin 

*Vyatka State Agrotechnological University,
Kirov, Russian Federation*

 *nirs_vsaa@mail.ru*

Abstract

Introduction. The characteristics of diesel fuel, including its chemical composition and physico-chemical properties, directly correlate with the engine operation environmental aspects. They determine the soot formation intensity in combusting and soot emissions into the atmosphere with exhaust gases. When an engine operates using alternative biofuels in different load and speed modes, the fuel combustion conditions in the diesel cylinder vary depending on the injection and spraying parameters and the droplet size of the biofuel used that leads to the modification of the soot emission characteristics. The relevance of studying the soot formation in diesel biofuel-powered engines is caused by its direct effect on combustion efficiency, the level of toxic emissions, and on the economic and environmental engine characteristics.

Aim of the Study. The study is aimed at investigating the effect of methanol and methyl ester of rapeseed oil on forming soot and reducing smoke content of diesel engine exhaust gases.

Materials and Methods. The adequacy and topicality of experimental data processing methods is confirmed by experimental studies and analytical dependencies. Experimental studies were conducted according to the GOST 18509-88 methodology, the samples to determine the smoke content of exhaust gases were taken according to the GOST 24028-2013, GOST 17.2.2.02-98, GOST R 41.24-2003 methods. The parameters of the combustion process were determined according to the methods of the Central Scientific Research Diesel Institute, the calculated characteristics of soot were determined according to the Central Research Diesel Institute, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University methods and the Vyatka State Agrotechnological University programs.

Results. There have been studied the morphology and microstructure of aggregate soot particles. There have been considered the physicochemical characteristics of the fuels used in a diesel engine. When operating in the main load and speed modes of a diesel engine running on methanol and methyl ether of rapeseed oil, there have been found exhaust smoke values, temperatures in the zones of soot formation and burnout, the number and diameter of soot particles, the mass content and concentration of soot. There have been also found their maximum values and has been determined the corresponding angle of crankshaft rotation. In the course of the study, the complete replacement of standard petroleum diesel fuel in diesel engines with methanol and methyl ester of rapeseed oil was successfully carried out.

Discussion and Conclusion. The study confirms the possibility to replace completely the standard fuel for the diesel engine with methanol and methyl ester of rapeseed oil that reduces significantly exhaust smoke. The calculated values of the soot concentration in the cylinder correspond to current theoretical models describing the processes occurring inside the cylinder, and are confirmed by the experimental data of the exhaust smoke measurements. Further research areas may include adapting the alternative fuel used and optimizing the fuel supply system of a diesel engine to achieve the lowest possible level of exhaust smoke.

Keywords: soot formation, soot particles, exhaust smoke, diesel engine, methanol, methyl ester of rapeseed oil

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

For citation: Likhanov V.A., Lopatin O.P. Reduction of Smoke and Soot Formation in a Diesel Engine by Replacing Completely Petroleum Fuel with Methanol and Methyl Ester of Rapeseed Oil. *Engineering Technologies and Systems*. 2026;36(2):392–415. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.26362.392-415>

ВВЕДЕНИЕ

В общем энергетическом балансе процесса горения сажа считается нежелательным продуктом как с экономической, так и с экологической точки зрения. В то же время в ряде отраслей сажа представляет собой ключевой продукт горения, что обуславливает неизменный научный интерес к процессам ее формирования [1; 2]. Несмотря на противоположные задачи (снижение и увеличение образования сажи) фундаментальные физико-химические принципы, лежащие в основе этого явления, во многом схожи. Общий базис позволяет эффективно применять накопленные знания из различных направлений науки о горении, формируя единую и надежную фундаментальную базу при изучении сажеобразо-

вания и решить важнейшую задачу – снизить дымность отработавших газов (ОГ) дизельного двигателя (ДД).

Предложенный комплексный подход особенно актуален при анализе процессов сгорания в ДД, работающих на новых и альтернативных видах топлива. Это обусловлено тем, что многостадийный механизм образования сажи требует глубокого понимания физико-химических закономерностей для оптимизации работы современных энергетических установок [3; 4]. Кроме того, в условиях урбанизированных территорий, характеризующихся высокой концентрацией транспортных средств, выбросы сажи представляют собой серьезные локальные экологические проблемы. Они негативно влияют на качество воздуха и здоровье населения, в частности, на респираторную систему. Следовательно, глубокое изучение механизмов сажеобразования и ее эмиссии с отработавшими газами ДД имеет первостепенное значение для практической деятельности и развития отрасли науки в целом.

По своим показателям применимости и доступности биодизельный двигатель сопоставим с классическим дизельным, поскольку биодизельное топливо, характеризующееся необходимыми экологическими параметрами, обладает тенденцией к доступности и совместимости с существующим нефтяным дизельным топливом (ДТ).

В современных условиях технологического развития для производства биотоплива достаточно действующей инфраструктуры и существующего уровня развития аграрного сектора экономики. Таким образом, использование ДД, работающих на биотопливе, актуально как в транспортном секторе, так и в агропромышленной сфере. Следовательно, такое топливо можно рассматривать как часть решения проблемы снижения дымности ОГ ДД и улучшения экологии [5; 6].

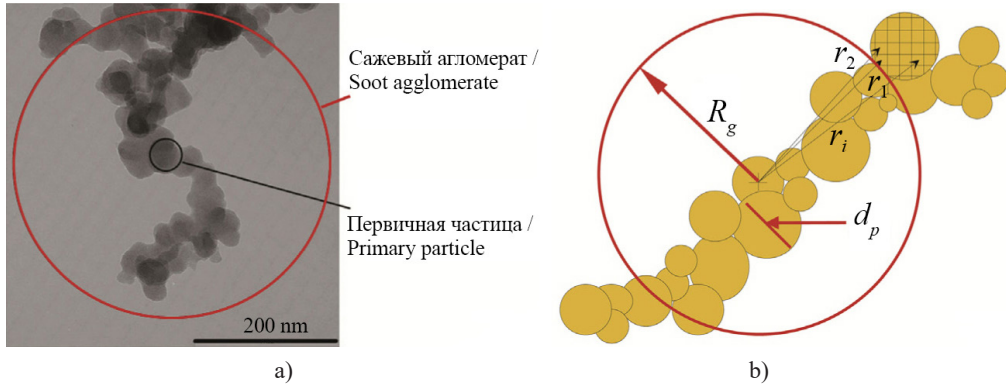
Целью исследования является определение сажевыделения и снижение дымности отработавших газов дизельного двигателя при работе на метаноле и метиловом эфире рапсового масла (МЭРМ).

Физико-химические характеристики исследуемого биотоплива предположительно отличаются от штатного, поэтому даже на первом этапе его применения необходимо учитывать плотность и вязкость используемого топлива. Данные показатели оказывают влияние на определяющие с точки зрения образования сажи параметры впрыскивания и распыливания в ДД [7; 8].

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Интенсивные научные исследования посвящены физико-химическим свойствам сажи. Современные аналитические методы, включая просвечивающую электронную микроскопию высокого разрешения, рентгеномископию, спектроскопию, газовую хроматографию, а также контактные и оптические методы, позволили за последние десятилетия детально изучить размеры, структуру и физико-химические характеристики сажи [9; 10].

Для изучения и описания рабочих процессов сажеобразования особый интерес представляют показатели морфологии и микроструктуры ее агрегатных частиц, представленные на рисунке 1 [11].



Р и с. 1. Схема сажевых частиц:
 а) изображения отобранных первичных частиц;
 б) схема определения среднего диаметра первичных частиц

F i g. 1. Diagram of soot particles:
 а) images of selected primary particles;
 б) scheme for determining the average diameter of primary particles

Примечание: R – радиус инерции (гирации) агрегата, нм; d_p – средний диаметр первичной частицы, нм; r_1, r_2, r_i^g – расстояния 1, 2 и i -той частицы до общего центра масс, нм.

Note: R_g is the radius of inertia (gyration) of the aggregate, characterizing the spatial distribution of the mass of the primary particles relative to the center of mass of the aggregate, nm; d_p is the average diameter of the primary particle, nm; r_1, r_2, r_i are the distances of the 1st, 2nd and i -th particle to the common center of mass, nm.

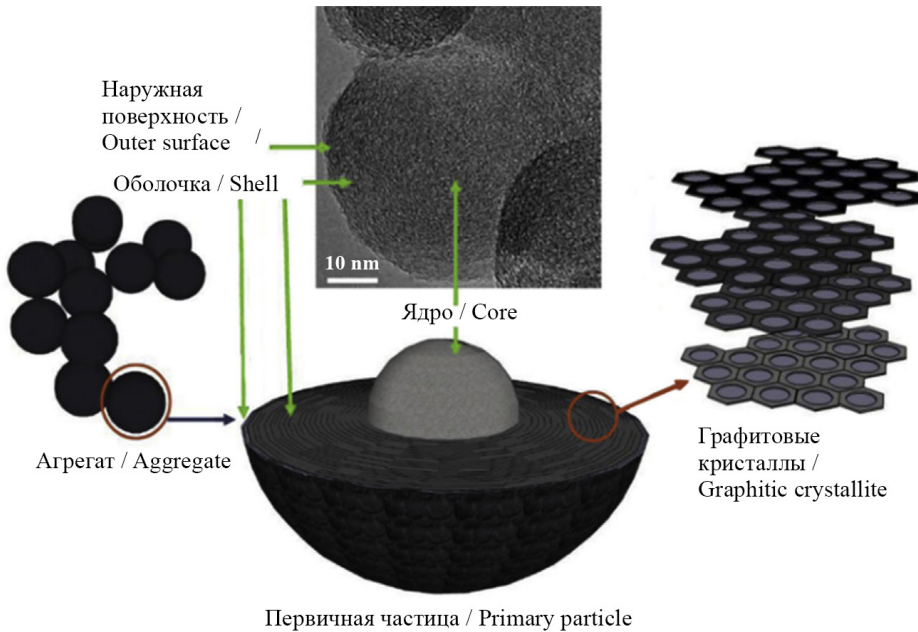
Источник: рисунки 1–3 взяты из статьи [11].

Source: figures 1–3 are taken from the article [11].

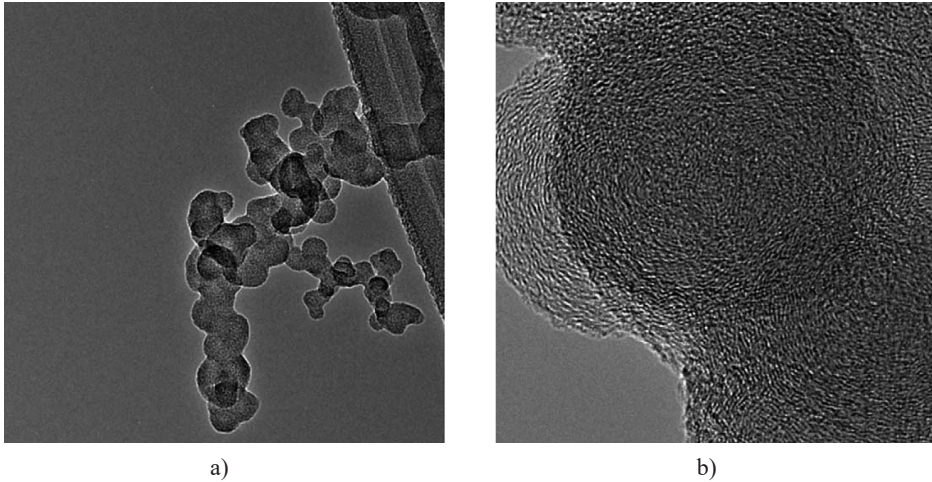
На основе представленной на рисунке 1 схемы базируется метод анализа изображений для определения размеров первичных частиц d_p и параметров отобранных сажевых агрегатов [12; 13].

На рисунке 2 изображены (в наномасштабе) отдельные части первичной частицы сажи – внутреннее ядро и его внешняя оболочка [14; 15].

Согласно исследованию авторского коллектива из Польши [14], структура частиц характеризуется наличием внутреннего ядра, состоящего из множества мелких частиц с собственным ядром, которые, в свою очередь, покрыты углеродными слоями турбостратной структуры. Внешняя оболочка образована графитовыми кристаллитами, ориентированными параллельно внешней поверхности, что согласуется с данными просвечивающей электронной микроскопии, представленными на рисунке 3 [16]. При этом остается дискуссионным вопрос о природе первичного зародыша частицы: являются ли им полициклические ароматические углеводороды или ацетилен.



Р и с. 2. Структура первичной частицы сажи при горении дизельного топлива
F i g. 2. The structure of the primary soot particle during the combustion of diesel fuel



Р и с. 3. Микрофотографии частиц сажи: а) агломерат; б) первичная частица
F i g. 3. Micrographs of soot particles: a) agglomerate; b) primary particle

Таким образом, учитывая данные предыдущих исследований [14–16], можно предположить, что при сгорании биотоплива возможно присутствие на ранних стадиях образования достаточного количества различных алифатических соединений, что будет в большей степени свидетельствовать в пользу ацетиленовой теории,

предполагающей более активное вовлечение ацетилена как в начальные стадии формирования сажевых частиц, так и в последующий рост их поверхности [17; 18].

Анализ исследований по применению биотоплива свидетельствует о сокращении дымности ОГ, а также основного спектра загрязняющих атмосферу веществ [19; 20]. Наиболее существенное снижение зафиксировано при увеличении доли применяемого метанола в топливе, что не зависит от способа подачи метанола в зону сгорания¹ [21; 22].

На сегодняшний день известно три метода введения метанола для ДД Д-2156-МТН-8, устанавливаемого на грузовые автомобили². Метанол дозируется в виде спирто-топливной эмульсии на стадии впуска, используя форсуночную систему и вспомогательный насос. Важно отметить, что использование метанола в эмульгированном состоянии приводит к значительному снижению содержания как сажи, так и оксидов азота NO_x в ОГ.

В исследованиях В. А. Лиханова и А. М. Сайкина метанол подается на впуске ДД³. Ученые отметили снижение дымности ОГ на 20 % при замещении 15 % ДТ, а при замещении 30 % снижение дымности уже составило 40 %. Также было описано впрыскивание метанола сразу в камеру сгорания ДД, что привело к снижению дымности ОГ минимум в 2 раза [22].

Были проведены исследования по применению диссоциированного метанола в ДД 6ЧН 12/14 в качестве дополнительного топлива, подаваемого перед турбиной. Процесс включал предварительное испарение метанола за счет тепловой энергии ОГ и его последующее каталитическое разложение. Результаты экспериментов продемонстрировали существенное снижение концентрации сажи и углеводородов С_Н в ОГ⁴.

Коллектив ученых из Польши и Венгрии рассмотрел спиртосодержащее топливо, состоящее из 85 % этанола и 15 % ДТ. Они осуществляли впрыск во впускной коллектор пропорционально энергетической составляющей по отношению к штатному топливу в размере от 20 до 90 %. Отмечено существенное снижение дымности ОГ в размере 90 % при максимальном замещении штатного ДТ [23].

Представленные исследования доказывают, что применение в ДД метанола приводит к значительному уменьшению в ОГ сажи, что также может быть подтверждением вывода о наличии кислорода в метаноле, позволяющее достичь эффекта снижения дымности ОГ.

Отечественные исследователи предлагают использование МЭРМ вместо традиционного штатного ДТ для снижения выбросов сажи [24; 25]. Так, В. А. Марков, А. А. Зенин и С. Н. Девянин для ДД Д-245.12С установили оптимальный в плане достижения экологического эффекта состав биотоплива, замещающий 40 % МЭРМ

¹ Лиханов В.А., Сайкин А.М. Снижение токсичности автотракторных дизелей. М.: Колос; 1994. 224 с. <https://elibrary.ru/wlnskz>

² Там же.

³ Там же.

⁴ Лиханов В.А., Лопатин О.П. Использование природного газа, спиртов и топлив на их основе в дизельных двигателях. Киров: Вятская ГСХА; 2018. 395 с. <https://elibrary.ru/xoywax>

в общем количестве штатного ДТ [26]. Однако ученые Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана указывают, что такой состав топлива ограничен ухудшением показателей процесса сгорания, поэтому процент замещения нефтяного топлива нецелесообразно увеличивать⁵.

Проведено исследование ДД УК-2 при работе на рапсовом масле и МЭРМ. Так, отмечены хорошие показатели по снижению дымности ОГ при вынужденном ограничении процента замещения штатного топлива МЭРМ вследствие увеличения расхода топлива, вызванного большей вязкостью применяемого биотоплива⁶.

Результаты обзора литературы научных исследований доказывают надежное снижение содержания сажи в отработавших газах ДД за счет применения в качестве топлива метанола и МЭРМ. Однако основной проблемой для полного замещения штатного ДТ являются физико-химические свойства применяемых биотоплив (табл. 1 и 2), ухудшающие параметры процесса сгорания ДД, что влияет на процессы топливоподачи и распыливания [27].

Т а б л и ц а 1

Table 1

Сравнительные физико-химические характеристики исследуемых топлив [28]

Comparative physico-chemical characteristics of the studied fuels [28]

Свойства / Features	Топливо / Fuel		
	Дизельное топливо / Diesel fuel	Рапсовое масло / Rapeseed oil	Метилловый эфир рапсового масла / Methyl ester of rapeseed oil
Элементарный состав, кг/кг; / Elementary composition, kg/kg			
углерод / Carbon	0,87	0,77	0,78
водород / Hydrogen	0,13	0,12	0,13
кислород / Oxygen	–	0,11	0,09
Плотность при 15 °С, кг/м ³ / Density at 15 °С, kg/m ³	863	877	860–900
Теоретическое количество воздуха, необходимое для полного сгорания 1 кг топлива, кг воздуха/кг топлива / Theoretical amount of air required for complete combustion of 1 kg of fuel, kg of air/kg of fuel	14,35	12,50	12,70
Поверхностное натяжение, Н/м при 20 °С / Surface tension, N/m at 20 °С	27,1·10 ⁻³	33,2·10 ⁻³	30,7·10 ⁻³
Температура вспышки, °С / Flash point, °С	35–80	100	120
Вязкость при 20 °С, мм ² /с, (сСт) / Viscosity at 20 °С, mm ² /s, (cSt)	3,0–6,0	80	12
Теплота сгорания, кДж/кг / Heat of combustion, kJ/kg	42 530	36 700	37 200
Цетановое число / The cetane number	45	44	51

⁵ Марков В.А., Баширов Р.М., Габитов И.И. Токсичность отработавших газов дизелей. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана; 2002. 376 с. <https://elibrary.ru/qceidv>

⁶ Лиханов В.А., Лопатин О.П. Использование природного газа, спиртов и топлив на их основе в дизельных двигателях.

Физико-химические характеристики метанола⁷

Physico-chemical characteristics of methanol

Наименование показателя / Naming of the indicator	Значение / Meaning
Внешний вид / Appearance	Бесцветная прозрачная жидкость без нерастворимых примесей / Colorless transparent liquid without insoluble impurities
Массовая доля этилового спирта, %, не более / Mass fraction of ethyl alcohol, %, max	0,01
Плотность при 20 °С, г/см ³ / Density at 20 °С, g/cm ³	0,791–0,792
Массовая доля нелетучего остатка после испарения, %, не более / Mass fraction of non-volatile residue after evaporation, %, max	0,001
Температурные пределы: / Temperature limits: – предел кипения, °С / Boiling point, °С – 99 % продукта перегоняется в пределах, °С, не более / 99% of the product is distilled within, °С, no more	64,0–65,5 0,8
Массовая доля хлора, %, не более / Mass fraction of chlorine, %, max	0,0001
Массовая доля аммиака и аминоксоединений в пересчете на аммиак, %, не более / Mass fraction of ammonia and amino compounds in terms of ammonia, %, max	0,00001
Испытания с перманганатом калия, мин, не менее / Tests with potassium permanganate, min, not less	60
Массовая доля серы, %, не более / Mass fraction of sulfur, %, max	0,0001
Массовая доля летучих соединений железа в пересчете на железо, %, не более / Mass fraction of volatile iron compounds in terms of iron, %, max	0,00001
Массовая доля альдегдов и кетонов в пересчете на ацетон, %, не более / Mass fraction of aldehydes and ketones in terms of acetone, %, max	0,003
Массовая доля свободных кислот в пересчете на муравьиную кислоту, %, не более / Mass fraction of free acids in terms of formic acid, %, max	0,0015
Массовая доля воды, %, не более / Mass fraction of water, %, max	0,05

Применение метанола и МЭРМ в ДД может позволить минимизировать не только выбросы сажи, но и основные вредные вещества CO, NO_x, CH_x, а также полностью исключить необходимость применения нефтяного ДТ. Использование биодизельного топлива возможно сократит выбросы твердых частиц и дымность ОГ и, следовательно, улучшит экологические показатели ДД [29; 30].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования

Для проведения испытаний был задействован двухцилиндровый ДД воздушного охлаждения 2Ч 10,5/12,0. Данный двигатель, произведенный Владимирским моторо-тракторным заводом, оснащен неразделенной полусферической камерой сгорания в поршне (рис. 4).

⁷ Лопатин О.П. Применение природного газа и спирто-топливных эмульсий для снижения содержания оксидов азота в дизеле: дис. ... д-ра. техн. наук. Киров; 2020. 458 с. <https://elibrary.ru/dzkskn>



Р и с. 4. Объект исследования

F i g. 4. The object of the study

Источник: фотографии для рисунков 4, 6 были сделаны В. А. Лихановым в лаборатории кафедры тепловых двигателей автомобилей и тракторов Вятского ГАТУ (г. Киров, Россия).

Source: the photographs for figures 4 and 6 were taken by V. A. Likhanov in the laboratory of the Department of Thermal Engines of Automobiles and Tractors of Vyatka State Agrotechnological University (Kirov, Russia).

Методы, оборудование и процедура исследования

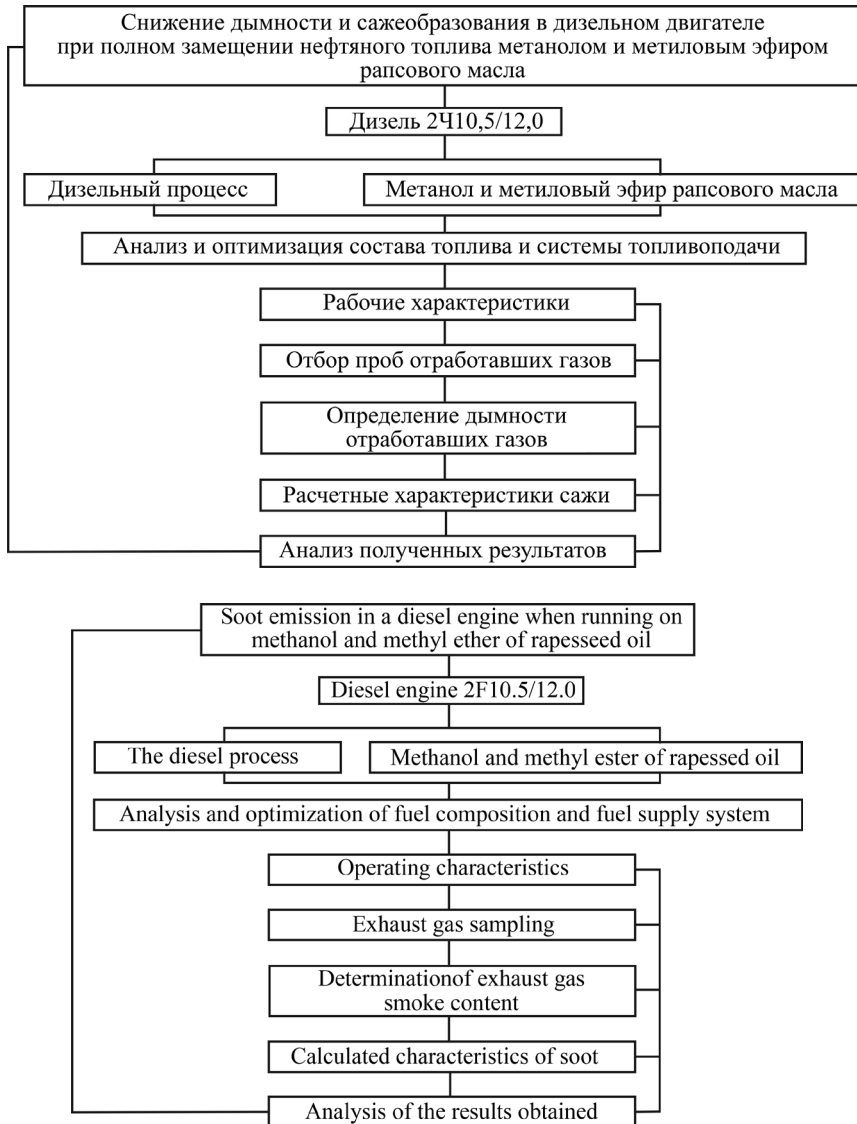
Исследования были проведены на базе научно-исследовательской лаборатории кафедры тепловых двигателей, автомобилей и тракторов Вятского государственного агротехнологического университета Министерства сельского хозяйства Российской Федерации.

Характеристика проведенного исследования включает в себя несколько последовательно проведенных этапов, схематично изображенных на рисунке 5.

В качестве инициатора горения (пилотного топлива) был задействован МЭРМ, физико-химические характеристики которого обеспечивали его самовоспламенение в ДД [31; 32].

На первом этапе осуществляли анализ и оптимизацию состава топлива и системы топливоподачи. В ДД была применена гибридная система подачи топлива. Метанол, как основное топливо, поступал через стандартный топливный контур, а для обеспечения воспламенения (пилотный режим) использовался МЭРМ, для которого была предусмотрена отдельная система. Эта система включала штифтовые форсунки (ФШ–6–2×25), топливный насос высокого давления 2 УТНМ, а также необходимые топливопроводы, фильтр и отдельный топливный бак. Процесс запуска и прогрева двигателя проходил на МЭРМ, после чего начинался впрыск метанола, а расход МЭРМ снижался до минимального значения, необходимого для устойчивой работы. После установления рабочего режима, цикловая подача МЭРМ

оставалась постоянной (12 %), в то время как метанол составлял 88 % от общего объема подаваемого топлива. Регулировку рабочих параметров ДД осуществляли путем изменения величины цикловой подачи метанола⁸.



Р и с. 5. Схема проведения исследования
F i g. 5. The scheme of the study

Источник: рисунок 5 составлен авторами статьи в программе CorelDRAW.

Source: figure 5 was compiled by the authors of the article in the program CorelDRAW.

⁸ Лиханов В.А., Лопатин О.П. Использование природного газа, спиртов и топлив на их основе в дизельных двигателях.

На втором этапе экспериментально был выполнен комплекс мероприятий по снятию рабочих характеристик двигателя с отбором проб ОГ и определением дымности. Снятие всех рабочих характеристик с двигателя (регулируемых, нагрузочных, скоростных) проводилось в соответствии с требованиями ГОСТ 18509-88⁹. Для снятия характеристик был использован электротормозной стенд САК-Н670 с интегрированной балансирной маятниковой машиной (рис. 6).



Р и с. 6. Пульт управления экспериментальной установкой
F i g. 6. Experimental installation control panel

Отбор проб и определение дымности ОГ выполняли с помощью прибора Bosch EFAW-68A по методикам ГОСТ 24028-2013¹⁰, ГОСТ 17.2.2.02-98¹¹, ГОСТ Р 41.24-2003¹².

Третий этап включал в себя выполнение расчетных характеристик сажи. В зависимости от изменения угла ϕ ПКВ были определены: температура T в зонах образования и выгорания сажи, количество частиц сажи, их текущий среднемассовый диаметр, массовое содержание и концентрация сажи в цилиндре ДД при работе на метаноле и МЭРМ. Далее в зависимости от изменения нагрузки определяли максимальное число частиц сажи, содержание сажи и соответствующие этим значениям углы ПКВ, концентрацию, массу, диаметр и количество частиц сажи в ОГ.

На четвертом этапе выполнялся анализ полученных результатов и оптимизация работы двигателя. Полученные расчетные значения сажи в цилиндре соответствуют актуальным теоретическим моделям, которые описывают протекающие внутри цилиндра процессы и подтверждаются в экспериментальными данными

⁹ ГОСТ 18509-88. Дизели тракторные и комбайновые. Методы стендовых испытаний. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200010002> (дата обращения: 03.06.2025).

¹⁰ ГОСТ 24028-2013. Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Дымность отработавших газов. Нормы и методы определения. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200104200> (дата обращения: 03.06.2025).

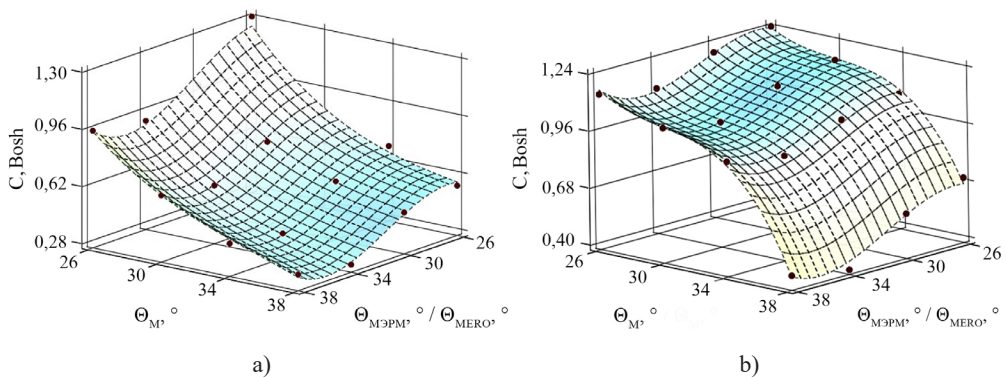
¹¹ ГОСТ 17.2.2.02-98. Охрана природы. Атмосфера. Нормы и методы определения дымности отработавших газов дизелей, тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200012788> (дата обращения: 03.06.2025).

¹² ГОСТ Р 41.24-2003. Правила ЕЭК ООН N 24. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200034424> (дата обращения: 03.06.2025).

по измерению дымности ОГ. Оптимизации работы двигателя для максимального КПД под нагрузкой достигали путем установки минимальной, но достаточной для устойчивой работы на низких оборотах и холостом ходу, запальной порции топлива. Было установлено, что размер запальной порции в 9,7 мг/цикл при номинальной частоте вращения 1800 мин^{-1} (что соответствует часовому расходу 1,05 кг/ч) удовлетворяет этим условиям. Дальнейшее снижение запальной порции вызывало неравномерность работы ДД¹³.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рисунке 7 представлены экспериментальные результаты дымности отработавших газов ДД при работе на метаноле и МЭРМ на различных установочных углах опережения впрыскивания топлива ($\Theta_{\text{МЭРМ}}$ – МЭРМ, $\Theta_{\text{М}}$ – метанола).



Р и с. 7. Дымность отработавших газов дизельного двигателя 2Ч 10,5/12,0 при работе на метаноле и метиловом эфире рапсового масла в зависимости от изменения установочных углов опережения впрыскивания:

а) $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,587 \text{ МПа}$; б) $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,594 \text{ МПа}$

Fig. 7. Smoke content of exhaust gases in the diesel engine 2F 10.5/12.0 when running on methanol and methyl ether of rapeseed oil, depending on changes in the setting angles of injection advance:

а) $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0.587 \text{ МПа}$; б) $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0.594 \text{ МПа}$

Примечание: n – частота вращения коленчатого вала, мин^{-1} ; p_e – среднее эффективное давление, МПа.

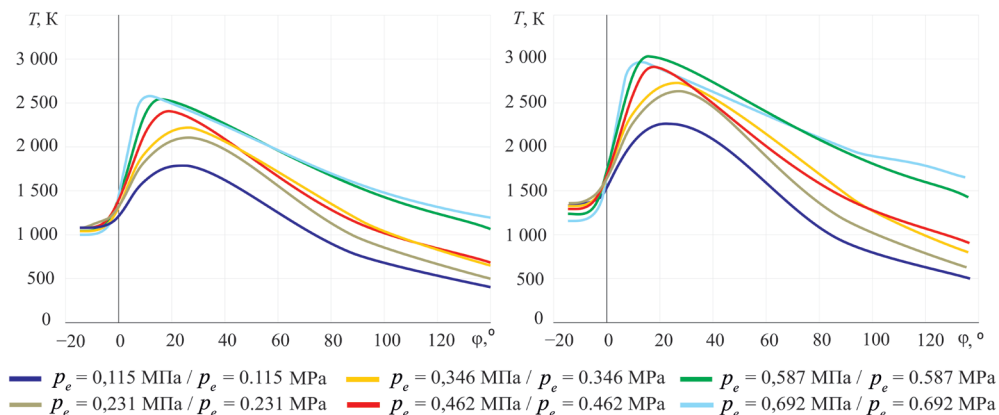
Note: n – is the speed of rotation of the crankshaft, min^{-1} ; p_e – is the average effective pressure, МПа.

Источник: графики для рисунков 7–14 составлены авторами статьи в программе CorelDRAW.

Source: the graphs for figures 7–14 were compiled by the authors of the article in the CorelDRAW program.

На рисунке 8 представлены расчетные характеристики температуры в цилиндре ДД при работе на метаноле и МЭРМ в зависимости от угла поворота коленчатого вала (ПКВ).

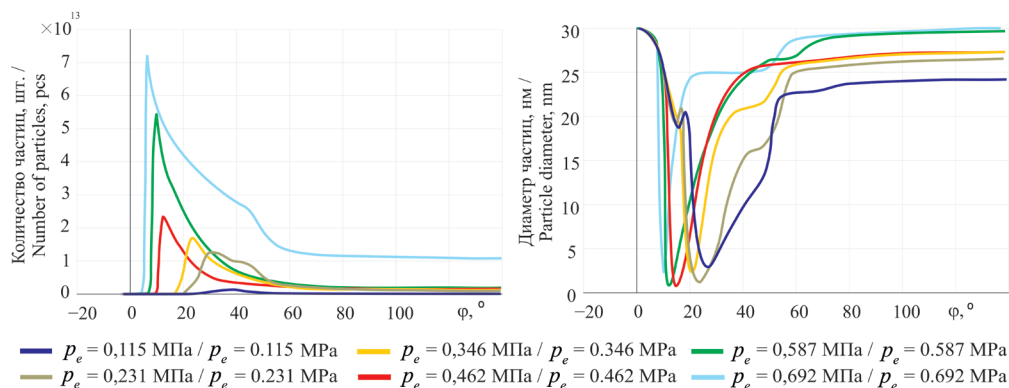
¹³ Марков В.А., Баширов Р.М., Габитов И.И. Токсичность отработавших газов дизелей.



Р и с. 8. Расчетные характеристики температуры T в цилиндре дизельного двигателя при работе на метаноле и метиловом эфире рапсового масла в зависимости от угла φ поворота коленчатого вала при $n = 1\,800\text{ мин}^{-1}$: а) в зоне образования сажи; б) в зоне выгорания сажи

F i g. 8. Calculated characteristics of the temperature T in the cylinder of a diesel engine when running on methanol and methyl ether of rapeseed oil, depending on the angle φ of rotation of the crankshaft at $n = 1,800\text{ min}^{-1}$: а) in the zone of soot formation; б) in the zone of soot burnout

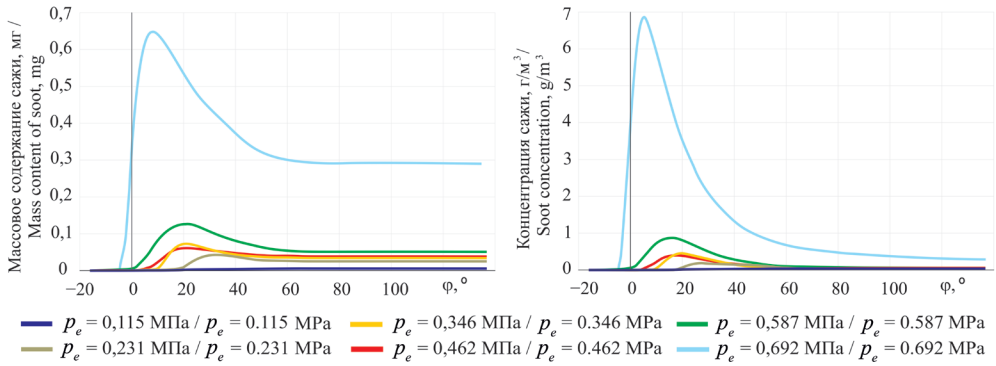
Расчетные характеристики частиц сажи в цилиндре ДД при работе на метаноле и МЭРМ в зависимости от угла ПКВ представлены на рисунке 9.



Р и с. 9. Расчетные характеристики частиц сажи в цилиндре дизельного двигателя при работе на метаноле и метиловом эфире рапсового масла в зависимости от изменения угла φ поворота коленчатого вала при $n = 1\,800\text{ мин}^{-1}$: а) количество частиц сажи, шт; б) текущий среднemasсовый диаметр частиц, нм

F i g. 9. Calculated characteristics of soot particles in a diesel engine cylinder when running on methanol and methyl ether of rapeseed oil, depending on the change in the angle φ of rotation of the crankshaft at $n = 1,800\text{ min}^{-1}$: а) the number of soot particles, pcs; б) the current average mass particle diameter, nm

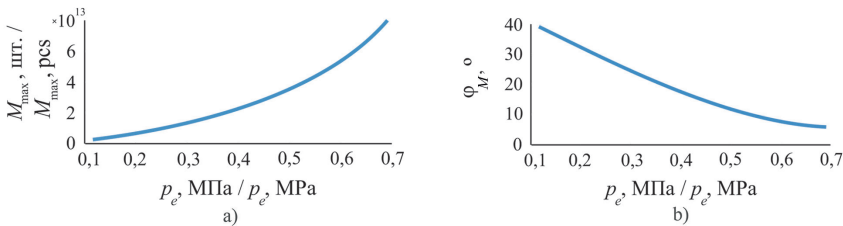
На рисунке 10 представлены результаты расчетов массового содержания и концентрации сажи в цилиндре ДД при работе на метаноле и МЭРМ в зависимости от изменения угла ПКВ.



Р и с. 10. Результаты расчетов в цилиндре дизельного двигателя при работе на метаноле и метиловом эфире рапсового масла в зависимости от изменения угла ϕ поворота коленчатого вала при $n = 1\,800\text{ мин}^{-1}$:
 а) массового содержания; б) концентрации сажи

F i g. 10. Calculation results in a diesel engine cylinder running on methanol and methyl ether of rapeseed oil, depending on the change in the angle ϕ of rotation of the crankshaft at $n = 1,800\text{ мин}^{-1}$:
 а) mass content; б) soot concentration

На рисунке 11 представлены расчетные показатели сажесодержания в цилиндре ДД при работе на метаноле и МЭРМ в зависимости от изменения среднего эффективного давления p_e .

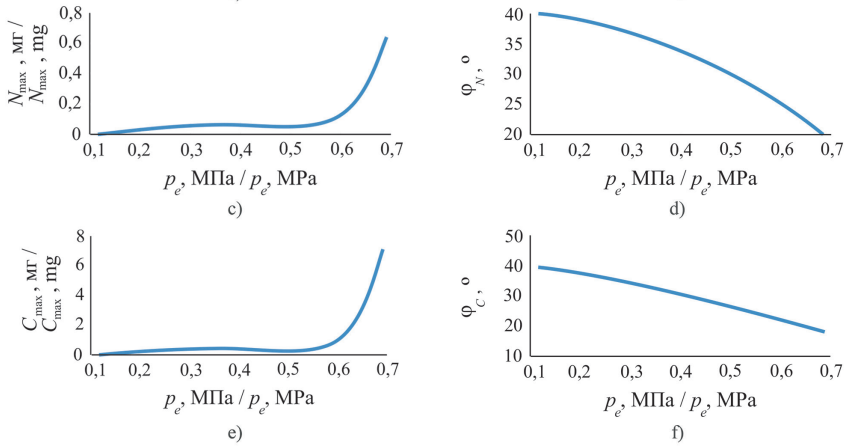


Р и с. 11. Расчетные показатели сажесодержания в цилиндре дизельного двигателя при работе на метаноле и метиловом эфире рапсового масла в зависимости от изменения нагрузки при $n = 1\,800\text{ мин}^{-1}$:
 а) максимальное число частиц сажи;
 б) угол, соответствующий максимальному числу частиц сажи

F i g. 11. Calculated indicators of soot content in a diesel engine cylinder when running on methanol and rapeseed oil methyl ether, depending on load changes at $n = 1,800\text{ мин}^{-1}$:
 а) the maximum number of soot particles;
 б) the angle corresponding to the maximum number of soot particles

Примечание: M_{\max} – максимальное число частиц, шт; ϕ_M – угол ПКВ, соответствующий максимальному числу частиц, град; N_{\max} – максимальное содержание сажи, мг; ϕ_N – угол ПКВ, соответствующий максимальному содержанию сажи, град; C_{\max} – максимальная концентрация сажи, г/м^3 ; ϕ_C – угол ПКВ, соответствующий максимальной концентрации сажи, град.

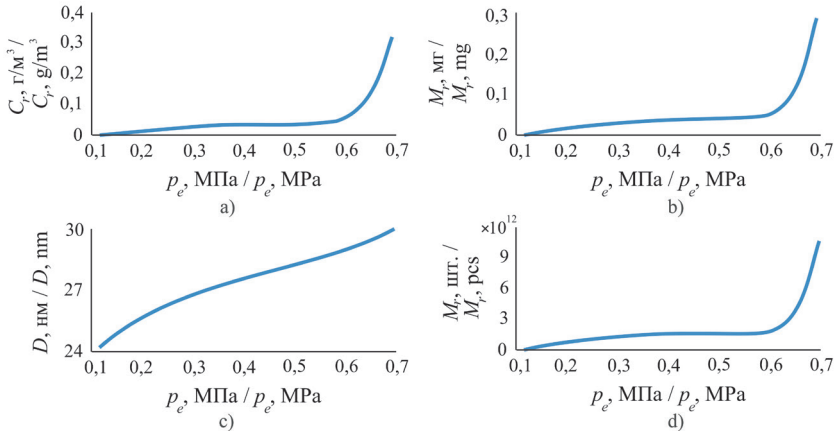
Note: M_{\max} – is the maximum number of particles, pcs; ϕ_M – is the angle of the soot corresponding to the maximum number of particles, deg; N_{\max} – is the maximum soot content, mg; ϕ_N – is the angle of the soot corresponding to the maximum soot content, deg; C_{\max} – is the maximum soot concentration, g/м^3 ; ϕ_C – is the angle of the soot corresponding to the maximum soot concentration, hail.



Р и с. 11. Расчетные показатели сажесодержания в цилиндре дизельного двигателя при работе на метаноле и метиловом эфире рапсового масла в зависимости от изменения нагрузки при $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$:
 с) максимальное содержание сажи; d) угол, соответствующий максимальному содержанию сажи; e) максимальная концентрация сажи; f) угол, соответствующий максимальной концентрации сажи

F i g. 11. Calculated indicators of soot content in a diesel engine cylinder when running on methanol and rapeseed oil methyl ether, depending on load changes at $n = 1,800 \text{ min}^{-1}$:
 c) the maximum soot content; d) the angle corresponding to the maximum soot content; e) the maximum soot concentration; f) the angle corresponding to the maximum soot concentration

На рисунке 12 представлены расчетные показатели сажесодержания в отработавших газах ДД при работе на метаноле и МЭРМ в зависимости от изменения нагрузки.



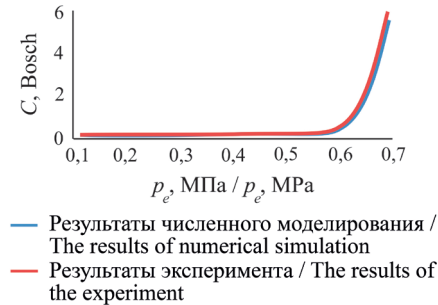
Р и с. 12. Расчетные показатели сажесодержания в отработавших газах дизельного двигателя при работе на метаноле и метиловом эфире рапсового масла в зависимости от изменения нагрузки при $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$:
 а) концентрация сажи; b) масса сажи; с) диаметр частиц сажи; d) количество частиц сажи

F i g. 12. Calculated indicators of soot content in the exhaust gases of a diesel engine when running on methanol and methyl ether of rapeseed oil, depending on the load change at $n = 1,800 \text{ min}^{-1}$:
 а) soot concentration; b) soot mass; с) diameter of soot particles; d) number of soot particles

Примечание: C_r – концентрация сажи, $\text{г}/\text{м}^3$; M_r – масса сажи, мг ; D – диаметр частиц, нм ; M – количество частиц, шт.

Note: C_r – is the concentration of soot, g/m^3 ; M_r – is the mass of soot, mg ; D – is the particle diameter, nm ; M – is the number of particles, pcs .

Результаты расчетов и экспериментальных измерений дымности ОГ при работе ДД на метаноле и МЭРМ в зависимости от нагрузки представлены на рисунке 13.

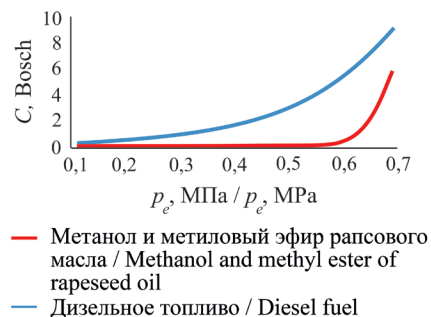


Р и с. 13. Результаты расчетов и экспериментальные данные дымности отработавших газов дизельного двигателя при работе на метаноле и метилом эфире рапсового масла при $n = 1\,800 \text{ мин}^{-1}$

Fig. 13. Calculation results and experimental data of the smoke content of diesel engine exhaust gases when running on methanol and methyl ether of rapeseed oil at $n = 1,800 \text{ min}^{-1}$

Примечание: C – дымность отработавших газов, Bosch.
Note: C – smoke content of exhaust gases, Bosch.

На рисунке 14 показаны результаты экспериментальных данных дымности отработавших газов ДД в зависимости от изменения нагрузки.



Р и с. 14. Экспериментальные данные дымности отработавших газов дизельного двигателя в зависимости от изменения нагрузки при $n = 1\,800 \text{ мин}^{-1}$

Fig. 14. Experimental data on the smoke content of diesel engine exhaust gases as a function of load changes at $n = 1,800 \text{ min}^{-1}$

Наблюдается надежное снижение дымности отработавших газов ДД при работе на метаноле и МЭРМ в сравнении с дизельным процессом с 5,3 (ДТ) до 0,4 ед. Bosch (метанол и МЭРМ), или в 13,25 раза (номинальный режим).

ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ полученных данных выявил следующие существенные закономерности. При работе двигателя на номинальной частоте вращения ($1\,800 \text{ мин}^{-1}$) минимальное значение дымности ОГ (0,4 ед. Bosch) было зафиксировано при углах опережения впрыскивания МЭРМ и метанола, равных 34° (рис. 7 а). Наибольшая степень

дымности ОГ (1,3 ед. Bosch) была зафиксирована при углах опережения впрыска метанола, равных 26° . Это явление можно объяснить тем, что более позднее начало подачи топлива приводит к преобладанию диффузионного режима его сгорания, что, в свою очередь, влечет за собой рост дымности ОГ.

На режиме максимального крутящего момента (рис. 7 б) наблюдается схожая динамика дымности ОГ. Наименьшая дымность (0,4 ед. Bosch) достигается при углах опережения зажигания $\Theta_{\text{МЭРМ}} = 34^\circ$ и $\Theta_{\text{М}} = 38^\circ$. При снижении $\Theta_{\text{МЭРМ}}$ до 26° дымность увеличивается до 0,7 ед. Bosch. Максимальная дымность на режиме максимальной мощности (1,25 ед. Bosch) зафиксирована при одновременном значении углов $\Theta_{\text{МЭРМ}} = 26^\circ$ и $\Theta_{\text{М}} = 26^\circ$.

Результаты численного моделирования температурных полей в цилиндре ДД при номинальном режиме выявили, что пиковая температура в области формирования сажи достигает 2 500 К при угле ПКВ $16,5^\circ$ (рис. 8 а). В зоне полного выгорания сажи максимальное значение температуры составило 3 000 К, зафиксированное при угле $16,6^\circ$ ПКВ (рис. 8 б).

Максимальное количество сажевых частиц при номинальном режиме достигает $5,6 \cdot 10^{13}$ шт. при угле ПКВ $9,1^\circ$ (рис. 9 а). Средний диаметр этих частиц на выходе составил 29,8 нм (рис. 9 б). Снижение темпов образования и общего числа сажевых частиц объясняется более длительным процессом сгорания, уменьшенной подачей топлива и более низкой температурой газов. Напротив, при высоких нагрузках увеличение количества сажи обусловлено ростом температуры в зоне пиролиза, что ускоряет конденсацию углерода и распад углеводородов топлива. Анализ номинального режима также показал, что пиковое содержание сажи (0,1255 мг) наблюдается при 30° ПКВ, а максимальная концентрация ($0,9 \text{ г/м}^3$) – при $25,9^\circ$ (рис. 10 а, б).

По результатам расчетов (рис. 11) установлено, что при номинальном режиме максимальное число частиц сажи достигается при угле $9,1^\circ$ ПКВ и составляет $5,6 \cdot 10^{13}$ шт. (рис. 11 а, б), максимальное содержание сажи достигается при угле 30° ПКВ и составляет $N_{\text{max}} = 0,1255 \text{ мг}$ (рис. 11 с, d), максимальная концентрация сажи достигается при угле $25,9^\circ$ ПКВ и составляет $C_{\text{max}} = 0,9 \text{ г/м}^3$ (рис. 11 е, f). Анализ представленных на рисунке 12 расчетов показывает (номинальный режим) величины максимальной концентрации сажи $C_{\text{ог}} = 0,051 \text{ г/м}^3$ (рис. 12 а), массы сажи – 0,0474 мг (рис. 12 б), среднемассового диаметра частиц сажи на выпуске – $D = 29,8 \text{ нм}$ (рис. 12 с), количества частиц сажи – $1,81 \cdot 10^{12}$ шт. (рис. 12 d).

Результаты экспериментальных данных наглядно подтверждают значения расчетных показателей сажесодержания на всех исследуемых нагрузочных режимах. С увеличением нагрузки вследствие повышения часового расхода и цикловой подачи топлива увеличивается дымность отработавших газов ДД.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Введение оксигенированных топлив, таких как метанол и МЭРМ, в дизельное топливо, несмотря на их низкую вязкость и плотность, приводит к повышению содержания кислорода в смеси. Это, в свою очередь, значительно снижает образование сажи в отработавших газах дизельного двигателя по сравнению с использованием обычного ДТ.

Исследования работы ДД на метаноле и МЭРМ позволило установить зависимость максимальных расчетных концентраций сажи в цилиндре от угла ПКВ. Кроме того, были определены уровни содержания сажи в ОГ, а также ее текущие концентрации и массовые доли в цилиндре при варьировании режимов нагрузки и скорости.

При номинальном режиме работы, максимальное скопление сажи в цилиндре с использованием метанола и МЭРМ фиксируется на отметке 0,9 г/м³ при 25,9° ПКВ. В то же время для ДТ этот показатель значительно выше – 8,75 г/м³ при 14,5° ПКВ. Это означает, что при использовании ДТ сажеобразование происходит в 9,75 раза интенсивнее и начинается существенно раньше по сравнению с метанолом и МЭРМ. При использовании метанола и МЭРМ концентрация сажи в ОГ составила 0,0474 мг, что в 5,8 раза меньше по сравнению с показателем в 0,271 мг, зафиксированным при работе на ДТ.

Полученные в ходе расчетов значения концентрации сажи в цилиндре демонстрируют соответствие актуальным теоретическим моделям, описывающим внутрицилиндровые процессы и подтверждаются экспериментальными данными, полученными при измерении дымности ОГ.

Результаты экспериментальных испытаний свидетельствуют о том, что применение метанола и МЭРМ приводит к уменьшению уровня дымности ОГ:

На номинальном режиме ($n = 1\ 800\ \text{мин}^{-1}$, $p_e = 0,587\ \text{МПа}$) дымность ОГ на ДТ составила 5,3 ед. Bosch, а на метаноле/МЭРМ – 0,4 ед. Bosch, что соответствует снижению на 92,45 % (в 13,25 раза).

При минимальных оборотах ($n = 1\ 200\ \text{мин}^{-1}$) показатель изменился с 3,8 ед. Bosch (ДТ) до 0,2 ед. Bosch (метанол/МЭРМ), снизившись на 94,7 % (в 19 раз).

При максимальных оборотах ($n = 2\ 000\ \text{мин}^{-1}$) дымность составила 5,0 ед. Bosch (ДТ) против 0,6 ед. Bosch (метанол/МЭРМ), демонстрируя снижение на 88,0 % (в 8,33 раза).

Практической значимостью исследования является расчетное и экспериментальное обоснование снижения дымности и сажеобразования в ДД при работе его на метаноле и МЭРМ, что позволяет полностью заместить штатное нефтяное ДТ альтернативным (метанолом и МЭРМ) и значительно снизить уровень дымности ОГ.

Перспектива исследования заключается в разработке и поиске новых научно обоснованных технических и технологических решений с использованием методов углубленного изучения физико-химических закономерностей формирования сажи в ДД, функционирующих на нетрадиционных альтернативных топливах. Необходимо совершенствование механизмов оценки эмиссии сажи внутри цилиндра и в отработавших газах с учетом многозонных подходов при моделировании процессов, протекающих в цилиндре. Улучшение математических моделей, охватывающих не только фундаментальные аспекты горения, но и испарение топливной смеси с учетом эволюции факела топлива, скорости распространения фронта пламени и пространственно-временных параметров температурных полей, определяющих образование и последующее окисление сажи, а также локальных концентраций компонентов газовой фазы в цилиндре дизельного двигателя, работающего на альтернативном топливе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. An Ya., Zhang Yu., Chen T., Shi M., Wang Yu., Su Zh. и др. Numerical Study of Ducted Fuel Injection Strategy for Soot Emissions Reduction in a Heavy-Duty Diesel Engine. *Applied Thermal Engineering*. 2025;260:125066. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.125066>
2. Wang D., Bao G., He Ch., Li J., Chen Ya., Zhao L. и др. Investigation of the Impact of Combustion Chamber Geometry on Engine Combustion and Emission Performance Under Various Fuel Injection Timings with Biodiesel Blending. *Energy Science & Engineering*. 2025;13(1):268–289. <https://doi.org/10.1002/ese3.2000>
3. Pham D.T., Mai D.N., Ho D.T. Restrict Toxic Emissions from Internal Combustion Engines to Protect the Environment by using Diesel Fuel Mixed with Vegetable Oil. *Journal of Environmental and Earth Sciences*. 2025;7(2):62–75. <https://doi.org/10.30564/jees.v7i2.7693>
4. Ahmed B.M., Luo M., Elbadawi H.A.M., Mahmoud N.M., Sui P.-Ch. Experimental Study of 2-Ethylhexyl Nitrate Effects on Engine Performance and Exhaust Emissions of Diesel Engine Fueled with Diesel-2-Methylfuran Blends. *Energies*. 2025;18(1):98. <https://doi.org/10.3390/en18010098>
5. Agarwal S., Yadav A., Mudgal A., Khan S. Comparative Evaluation of Diesel Engine Performance and Emission Characteristics using Carbon Nanotubes & Graphene Oxide in Ternary Fuel (Jojoba Biodiesel-Diesel-Methanol) Blends. *Next Research*. 2025;2(1):100141. <https://doi.org/10.1016/j.nexres.2025.100141>
6. Rahim Ab.A., Saad I., Mohd Zulkifli N.W., Mohd Yusoff M.N.A. Performance and Emissions of Dual Alcohol Fuel Blend with B20 POME Biodiesel in Diesel Engine. *Sciences and Engineering*. 2025;87(3):455–463. <https://doi.org/10.11113/jurnalteknologi.v87.21791>
7. Yadav G.P.K., Muvvala P., Reddy R.M. Optimization of Injection Parameters, and Ethanol Shares for Cottonseed Biodiesel Fuel in Diesel Engine Utilizing Artificial Neural Network (ANN) and Taguchi Grey Relation Analysis (GRA). *Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics*. 2025;50(3). <https://doi.org/10.1515/jnet-2024-0095>
8. Hamzah A.H., Akroot A., Wahhab H.A.A. Effect of Nanoparticles and Biodiesel Blended with Diesel on Combustion Parameters in Compression Ignition Engine: Numerical Analysis. *Energy Engineering*. 2025;122(5):2059–2075. <https://doi.org/10.32604/ee.2025.061592>
9. No S.Y. Utilization of Pentanol as Biofuels in Compression Ignition Engines. *Frontiers in Mechanical Engineering*. 2020;(6). <https://doi.org/10.3389/fmech.2020.00015>
10. Gupta P., Dixit J., Bhoi R., Sharma D., Sharma N. Investigating the Effect of Using Butyl Palmitate as a Fuel Additive on Diesel Engine Performance, Combustion, Emission, and Soot Morphological Characteristics. *Journal of Energy Engineering*. 2025;151(3). <https://doi.org/10.1061/jleed9.eyJeng-5817>
11. Лиханов В.А., Лопатин О.П. Биотопливо или дымящие автомобили? *Теоретическая и прикладная экология*. 2021;(3):228–236. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2021-3-228-236>
12. Cabarcos A., Paz C., Pérez-Orozco R., Vence J. An Image-Processing Algorithm for Morphological Characterisation of Soot Agglomerates from TEM Micrographs: Development and Functional Description. *Powder Technology*. 2022;401:117275. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117275>
13. Lee K.O., Zhu J. Effects of Exhaust System Components on Particulate Morphology in a Light-duty Diesel Engine. In: SAE Transactions. Detroit: SAE International; 2005. pp. 52–60. <https://doi.org/10.4271/2005-01-0184>
14. Adamska K., Smykała S., Zieliński S., Szymański D., Hojeńska A., Stelmachowski P. и др. Oxidation of Soot Over Supported RuRe Nanoparticles Prepared by the Microwave-Polyol Method. *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*. 2021;(134):221–242. <https://doi.org/10.1007/s11144-021-02048-y>
15. Eigentler F., Gerlinger P. A Detailed PAH and Soot Model for Complex Fuels in CFD Applications. *Flow, Turbulence and Combustion*. 2022;(109):225–251. <https://doi.org/10.1007/s10494-022-00319-9>
16. Tsapenkov K.D., Kuraeva Yu.G., Sidorova E.I., Shtyrlov A.E., Zubrilin I.A. Effect of Fuel Composition on Sooting in Engines and Power Plants. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2024;(60):478–488. <https://doi.org/10.1134/S0010508224040099>

17. Dhairiyasamy R., Dixit S., Varshney D., Gabiriel D. Renewable Syngas and Biodiesel Dual Fuel Applications for Enhanced Engine Performance and Emission Control. *Industrial Crops and Products*. 2025;225:120509. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.120509>
18. D S., Murugesan S., T P., A N. Experimental Investigation of Nano-Additive Enhanced Azolla Biodiesel Blends for Improved Diesel Engine Performance and Emission Mitigation. *Engineering Research Express*. 2025;7:015542. <https://doi.org/10.1088/2631-8695/adb00b>
19. Martínez M., Martí-Aldaraví P., Salvador F.Ja., Martínez-Miracle E.C. In- and Near-Nozzle and External Flow Characterization in Gasoline Direct Injection (GDI) Engines – a Review of Latest Technologies and Trends. Part 2: Computational Background. *International Journal of Engine Research*. 2025;26(8). <https://doi.org/10.1177/14680874241309959>
20. Paredes-Rojas Ju.C., Costa-Castelló R., Vázquez-Medina R., Flores-Campos Ju.A., Torres-San Miguel Ch.R. Experimental Study on Using Biodiesel in Hybrid Electric Vehicles. *Energies*. 2025;18(7):1621. <https://doi.org/10.3390/en18071621>
21. Ayyappan K., Srinivasan D.R. Effect of Fuel Injection Pressure Variations on Engine Performance-Emission-Particulate Matter with Diesel-Iso-Butanol-Nanoparticle Fuels in Compression Ignition Engine. *Indian Journal of Science and Technology*. 2025;18(5):313–327. <https://doi.org/10.17485/ijst/v18i5.1733>
22. Duan H., Hu W., Wang J., Yin X., Hu E., Zeng Ke. Effects of Diesel Pilot-Injection Strategy on a Methanol/Diesel Dual-Direct Injection Engine. *Applied Thermal Engineering*. 2025;261:125106. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.125106>
23. Tutak W., Lukács K., Szwaja S., Bereczky Á. Alcohol-Diesel Fuel Combustion in the Compression Ignition Engine. *Fuel*. 2015;154(15):196–206. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.03.071>
24. Strizhak P.A., Antonov D.V., Aldoshin S.M., Yanovskii L.S. The Chemmotology of New Generation Synthetic Liquid Fuels. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2025;60(6):1409–1418. <https://doi.org/10.1007/s10553-025-01805-2>
25. Chłopek Z., Sar H., Szczepański K., Zakrzewska D. Operational Issues of Using Replacement Fuels to Power Internal Combustion Engines. *Energies*. 2023;16(6):2643. <https://doi.org/10.3390/en16062643>
26. Марков В.А., Зенин А.А., Деянин С.Н. Работа транспортного дизеля на смеси дизельного топлива и метилового эфира рапсового масла. *Турбины и дизели*. 2009;(3):14–19. URL: <http://www.turbine-diesel.ru/rus/node/382> (дата обращения: 07.08.2025).
27. Papalambrou G., Karystinos V. Parametric Investigation of Methanol Ratio and Diesel Injection Timing for a Marine Diesel-Methanol Dual-Fuel Engine. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2025;13(4):648. <https://doi.org/10.3390/jmse13040648>
28. Лиханов В.А., Юрлов А.С. Исследование работы дизеля на метаноле и метиловом эфире рапсового масла на установочных углах опережения впрыскивания топлива. *Вестник Чувашской государственной сельскохозяйственной академии*. 2018;2(5):94–99. URL: <http://academy21.ru/nauka-i-innovacii/vestnik-chuvashskoj-gsha-nauchnyj-zhurnal/> (дата обращения: 15.07.2025).
29. Hassan Q.H., Al-Abboodi H. How Methanol-Diesel Fuel Blends Influence the Performance Characteristics of a Compression Ignition Engine. *International Journal of Heat and Technology*. 2025;43(1):319–325. <https://doi.org/10.18280/ijht.430132>
30. Žaglinskis Ju., Rimkus A. Research on the Performance Parameters of a Compression-Ignition Engine Fueled by Blends of Diesel Fuel, Rapeseed Methyl Ester and Hydrotreated Vegetable Oil. *Sustainability*. 2023;15(20):14690. <https://doi.org/10.3390/su152014690>
31. Sánchez-Rodríguez G., Domenzain-González J., Verónico-Sánchez F.Ja., Pérez-López H.I., Zúñiga-Moreno A., Elizalde-Solis O. Density and Viscosity in Biodiesel + Diesel Mixtures from Recycled Feedstocks. *Applied Sciences*. 2025;15(7):3812. <https://doi.org/10.3390/app15073812>
32. Öner İ.V., Atabani A.E., Arslan E., Nadaroglu H., Ünalın S., Kahraman N. и др. Comprehensive Investigation of the Effects on Fuel, Performance and Emission Properties of Modify Fuel Blends Addition of Graphene Nanoplatelets to Ternary Fuel Blends (Diesel, Waste cooking Biodiesel, and Butanol) in a Diesel Engine. *Process Safety and Environmental Protection*. 2025;(194):360–381. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.11.080>

REFERENCES

1. An Ya., Zhang Yu., Chen T., Shi M., Wang Yu., Su Zh., et al. Numerical Study of Ducted Fuel Injection Strategy for Soot Emissions Reduction in a Heavy-Duty Diesel Engine. *Applied Thermal Engineering*. 2025;260:125066. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.125066>
2. Wang D., Bao G., He Ch., Li J., Chen Ya., Zhao L., et al. Investigation of the Impact of Combustion Chamber Geometry on Engine Combustion and Emission Performance Under Various Fuel Injection Timings with Biodiesel Blending. *Energy Science & Engineering*. 2025;13(1):268–289. <https://doi.org/10.1002/ese3.2000>
3. Pham D.T., Mai D.N., Ho D.T. Restrict Toxic Emissions from Internal Combustion Engines to Protect the Environment by using Diesel Fuel Mixed with Vegetable Oil. *Journal of Environmental and Earth Sciences*. 2025;7(2):62–75. <https://doi.org/10.30564/jees.v7i2.7693>
4. Ahmed B.M., Luo M., Elbadawi H.A.M., Mahmoud N.M., Sui P.-Ch. Experimental Study of 2-Ethylhexyl Nitrate Effects on Engine Performance and Exhaust Emissions of Diesel Engine Fueled with Diesel-2-Methylfuran Blends. *Energies*. 2025;18(1):98. <https://doi.org/10.3390/en18010098>
5. Agarwal S., Yadav A., Mudgal A., Khan S. Comparative Evaluation of Diesel Engine Performance and Emission Characteristics using Carbon Nanotubes & Graphene Oxide in Ternary Fuel (Jojoba Biodiesel-Diesel-Methanol) Blends. *Next Research*. 2025;2(1):100141. <https://doi.org/10.1016/j.nexres.2025.100141>
6. Rahim Ab.A., Saad I., Mohd Zulkifli N.W., Mohd Yusoff M.N.A. Performance and Emissions of Dual Alcohol Fuel Blend with B20 POME Biodiesel in Diesel Engine. *Sciences and Engineering*. 2025;87(3):455–463. <https://doi.org/10.11113/jurnalteknologi.v87i2.17191>
7. Yadav G.P.K., Muvvala P., Reddy R.M. Optimization of Injection Parameters, and Ethanol Shares for Cottonseed Biodiesel Fuel in Diesel Engine Utilizing Artificial Neural Network (ANN) and Taguchi Grey Relation Analysis (GRA). *Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics*. 2025;50(3). <https://doi.org/10.1515/jnet-2024-0095>
8. Hamzah A.H., Akroot A., Wahhab H.A.A. Effect of Nanoparticles and Biodiesel Blended with Diesel on Combustion Parameters in Compression Ignition Engine: Numerical Analysis. *Energy Engineering*. 2025;122(5):2059–2075. <https://doi.org/10.32604/ee.2025.061592>
9. No S.Y. Utilization of Pentanol as Biofuels in Compression Ignition Engines. *Frontiers in Mechanical Engineering*. 2020;(6). <https://doi.org/10.3389/fmech.2020.00015>
10. Gupta P., Dixit J., Bhoi R., Sharma D., Sharma N. Investigating the Effect of Using Butyl Palmate as a Fuel Additive on Diesel Engine Performance, Combustion, Emission, and Soot Morphological Characteristics. *Journal of Energy Engineering*. 2025;151(3). <https://doi.org/10.1061/jleed9.eyJeng-5817>
11. Likhhanov V.A., Lopatin O.P. Biofuels or smoking cars? *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 2021;(3):228–236. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2021-3-228-236>
12. Cabarcos A., Paz C., Pérez-Orozco R., Vence J. An Image-Processing Algorithm for Morphological Characterisation of Soot Agglomerates from TEM Micrographs: Development and Functional Description. *Powder Technology*. 2022;401:117275. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117275>
13. Lee K.O., Zhu J. Effects of Exhaust System Components on Particulate Morphology in a Light-duty Diesel Engine. In: SAE Transactions. Detroit: SAE International; 2005. pp. 52–60. <https://doi.org/10.4271/2005-01-0184>
14. Adamska K., Smykała S., Zieliński S., Szymański D., Hojeńska A., Stelmachowski P., et al. Oxidation of Soot Over Supported RuRe Nanoparticles Prepared by the Microwave-Polyol Method. *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*. 2021;(134):221–242. <https://doi.org/10.1007/s11144-021-02048-y>
15. Eigentler F., Gerlinger P. A Detailed PAH and Soot Model for Complex Fuels in CFD Applications. *Flow, Turbulence and Combustion*. 2022;(109):225–251. <https://doi.org/10.1007/s10494-022-00319-9>
16. Tsapenkov K.D., Kuraeva Yu.G., Sidorova E.I., Shtyrlov A.E., Zubrilin I.A. Effect of Fuel Composition on Sooting in Engines and Power Plants. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2024;(60):478–488. <https://doi.org/10.1134/S0010508224040099>

17. Dhairiyasamy R., Dixit S., Varshney D., Gabriel D. Renewable Syngas and Biodiesel Dual Fuel Applications for Enhanced Engine Performance and Emission Control. *Industrial Crops and Products*. 2025;225:120509. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.120509>
18. D S., Murugesan S., T P., A N. Experimental Investigation of Nano-Additive Enhanced Azolla Biodiesel Blends for Improved Diesel Engine Performance and Emission Mitigation. *Engineering Research Express*. 2025;7:015542. <https://doi.org/10.1088/2631-8695/adb00b>
19. Martínez M., Martí-Aldaraví P., Salvador F.Ja., Martínez-Miracle E.C. In- and Near-Nozzle and External Flow Characterization in Gasoline Direct Injection (GDI) Engines – a Review of Latest Technologies and Trends. Part 2: Computational Background. *International Journal of Engine Research*. 2025;26(8). <https://doi.org/10.1177/14680874241309959>
20. Paredes-Rojas Ju.C., Costa-Castelló R., Vázquez-Medina R., Flores-Campos Ju.A., Torres-San Miguel Ch.R. Experimental Study on Using Biodiesel in Hybrid Electric Vehicles. *Energies*. 2025;18(7):1621. <https://doi.org/10.3390/en18071621>
21. Ayyappan K., Srinivasan D.R. Effect of Fuel Injection Pressure Variations on Engine Performance-Emission-Particulate Matter with Diesel-Iso-Butanol-Nanoparticle Fuels in Compression Ignition Engine. *Indian Journal of Science and Technology*. 2025;18(5):313–327. <https://doi.org/10.17485/ijst/v18i5.1733>
22. Duan H., Hu W., Wang J., Yin X., Hu E., Zeng Ke. Effects of Diesel Pilot-Injection Strategy on a Methanol/Diesel Dual-Direct Injection Engine. *Applied Thermal Engineering*. 2025;261:125106. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.125106>
23. Tutak W., Lukács K., Szwaja S., Bereczky Á. Alcohol-Diesel Fuel Combustion in the Compression Ignition Engine. *Fuel*. 2015;154(15):196–206. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.03.071>
24. Strizhak P.A., Antonov D.V., Aldoshin S.M., Yanovskii L.S. The Chemmotology of New Generation Synthetic Liquid Fuels. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2025;60(6):1409–1418. <https://doi.org/10.1007/s10553-025-01805-2>
25. Chłopek Z., Sar H., Szczepański K., Zakrzewska D. Operational Issues of Using Replacement Fuels to Power Internal Combustion Engines. *Energies*. 2023;16(6):2643. <https://doi.org/10.3390/en16062643>
26. Markov V.A., Zenin A.A., Devyanin S.N. [Operation of a Transport Diesel Engine on Mixtures of Diesel Fuel and Methyl Ester of Rapeseed Oil]. *Turbines & Diesels Magazine*. 2009;(3):14–19. (In Russ.) Available at: <http://www.turbine-diesel.ru/rus/node/382> (accessed 07.08.2025).
27. Papalambrou G., Karystinos V. Parametric Investigation of Methanol Ratio and Diesel Injection Timing for a Marine Diesel-Methanol Dual-Fuel Engine. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2025;13(4):648. <https://doi.org/10.3390/jmse13040648>
28. Likhanov V.A., Yurlov A.S. [Investigation of the Operation of Diesel Engines Running on Methanol and Methyl Ether of Rapeseed Oil at Fuel Injection Fixer-Advanced Angles]. *Vestnik Chuvashskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii*. 2018;2(5):94–99. (In Russ.) Available at: <http://academy21.ru/nauka-i-innovacii/vestnik-chuvashskoj-gsha-nauchnyj-zhurnal/> (accessed 15.07.2025).
29. Hassan Q.H., Al-Abboodi H. How Methanol-Diesel Fuel Blends Influence the Performance Characteristics of a Compression Ignition Engine. *International Journal of Heat and Technology*. 2025;43(1):319–325. <https://doi.org/10.18280/ijht.430132>
30. Žaglinskis Ju., Rimkus A. Research on the Performance Parameters of a Compression-Ignition Engine Fueled by Blends of Diesel Fuel, Rapeseed Methyl Ester and Hydrotreated Vegetable Oil. *Sustainability*. 2023;15(20):14690. <https://doi.org/10.3390/su152014690>
31. Sánchez-Rodríguez G., Domenzain-González J., Verónico-Sánchez F.Ja., Pérez-López H.I., Zúñiga-Moreno A., Elizalde-Solis O. Density and Viscosity in Biodiesel + Diesel Mixtures from Recycled Feedstocks. *Applied Sciences*. 2025;15(7):3812. <https://doi.org/10.3390/app15073812>
32. Öner İ.V., Atabani A.E., Arslan E., Nadaroğlu H., Ünalın S., Kahraman N., et al. Comprehensive Investigation of the Effects on Fuel, Performance and Emission Properties of Modify Fuel Blends Addition of Graphene Nanoplatelets to Ternary Fuel Blends (Diesel, Waste cooking Biodiesel, and Butanol) in a Diesel Engine. *Process Safety and Environmental Protection*. 2025;(194):360–381. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.11.080>

Об авторах:

Лиханов Виталий Анатольевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой тепловых двигателей автомобилей и тракторов Вятского государственного агротехнологического университета (610017, Российская Федерация, г. Киров, Октябрьский пр., д. 133), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3033-7176>, Researcher ID: AGN-7347-2022, Scopus ID: 57197821797, SPIN-код: 9474-7629, lihanov.va@mail.ru

Лопатин Олег Петрович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры тепловых двигателей автомобилей и тракторов Вятского государственного агротехнологического университета (610017, Российская Федерация, г. Киров, Октябрьский пр., д. 133), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0806-6878>, Researcher ID: AAD-8374-2019, Scopus ID: 57197821205, SPIN-код: 8716-0189, nirs_vsaa@mail.ru

Вклад авторов:

В. А. Лиханов – контроль, лидерство и наставничество в процессе планирования и проведения исследования; применение статистических, математических, вычислительных или других формальных методов для анализа или синтеза данных исследования; создание и подготовка рукописи: критический анализ черновика рукописи, внесение замечаний и исправлений членами исследовательской группы, в том числе на этапах до и после публикации.

О. П. Лопатин – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов или сбор данных / доказательств; разработка или проектирование методологии исследования; создание моделей; создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования и полученных данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 12.11.2025; поступила после рецензирования 18.12.2025;
принята к публикации 23.12.2025*

About the authors:

Vitaly A. Likhanov, Dr.Sci. (Eng), Professor, Head of the Department of Heat Engines, automobiles and Tractors, Vyatka State Agrotechnological University (133 Oktyabrsky Ave., Kirov 610017, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3033-7176>, Researcher ID: AGN-7347-2022, Scopus ID: 57197821797, SPIN-code: 9474-7629, lihanov.va@mail.ru

Oleg P. Lopatin, Dr.Sci. (Eng), Associate Professor, Professor of the Department of Heat Engines, automobiles and Tractors, Vyatka State Agrotechnological University (133 Oktyabrsky Ave., Kirov 610017, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0806-6878>, Researcher ID: AAD-8374-2019, Scopus ID: 57197821205, SPIN-code: 8716-0189, nirs_vsaa@mail.ru

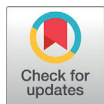
Authors contribution:

V. A. Likhanov – oversight and leadership responsibility for the research activity planning and execution, including mentorship external to the core team; application of statistical, mathematical, computational, or other formal techniques to analyse or synthesize study data; preparation, creation and / or presentation of the published work by those from the original research group, specifically critical review, commentary or revision – including pre- or post-publication stages.

O. P. Lopatin – conducting a research and investigation process, specifically performing the experiments, or data/evidence collection; development or design of methodology; creation of models; preparation, creation and / or presentation of the published work, specifically visualization / data presentation.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 12.11.2025; revised 18.12.2025; accepted 23.12.2025

МАШИНОСТРОЕНИЕ /
MECHANICAL ENGINEERING<https://doi.org/10.15507/2658-4123.26362.416-432>EDN: <https://elibrary.ru/axdrtw>

УДК / UDK 631.3.02

Оригинальная статья / Original article

Тетраборфосфатные ингибиторы для защиты рабочих органов сельскохозяйственных машин от коррозии в процессе межсезонного хранения**И. В. Фадеев¹✉, И. А. Успенский², М. Н. Чаткин³,
И. А. Юхин², С. Р. Петров⁴, А. С. Казарин⁵**¹ Чувашский государственный педагогический университет имени И. Я. Яковлева,г. Чебоксары, Российская Федерация, <https://ror.org/00x9nm172>² Рязанский государственный агротехнологический университет имени П. А. Костычева,г. Рязань, Российская Федерация, <https://ror.org/05q4zgg93>³ Национальный исследовательский Мордовский государственный университет,г. Саранск, Российская Федерация, <https://ror.org/0262qgk29>⁴ Чувашский государственный аграрный университет,

г. Чебоксары, Российская Федерация

⁵ Независимый исследователь,

г. Рязань, Российская Федерация

✉ ivan-fadeev-2012@mail.ru*Аннотация*

Введение. Проблема коррозионного разрушения рабочих органов сельскохозяйственных машин в период межсезонного хранения остается актуальной из-за неэффективности традиционных методов консервации. Решение этой проблемы необходимо для снижения материальных потерь, увеличения срока службы техники и обеспечения бесперебойности сезонных полевых работ.

Цель исследования. Теоретическое и экспериментальное обоснование применения тетраборфосфатов щелочных металлов и аммония в качестве высокоэффективных ингибиторов коррозии для защиты стали 65Г.

Материалы и методы. Объектом исследования является сталь 65Г, из которой изготавливают рабочие органы сельскохозяйственных машин. Ингибирующее действие синтезированных тетраборфосфатов лития, натрия, калия и аммония оценивали гравиметрическим (по ГОСТ 9.908–85, весы ВЛА-200 г-М), электрохимическим (потенциостат П-5848, трехэлектродная ячейка) и коррозионно-усталостным (база испытаний $2 \cdot 10^6$ циклов) методами в 3 %-м растворе NaCl.

© Фадеев И. В., Успенский И. А., Чаткин М. Н., Юхин И. А., Петров С. Р., Казарин А. С., 2026

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

Результаты исследования. При добавлении тетраборфосфата калия в 3 %-й раствор NaCl скорость коррозии стали 65Г составила $4,2 \cdot 10^{-3}$ г/(м²·ч), тогда как в растворе без ингибитора – $44,6 \cdot 10^{-3}$ г/(м²·ч). По данным электрохимических измерений потенциал коррозии стали в присутствии тетраборфосфата калия сместился с –0,42 до –0,16 В. В моющем растворе МС-8 с добавкой тетраборфосфата калия (5 кг/м³) при температуре 60 °С и продолжительности мойки 6 минут степень очистки поверхности достигла 88,9 %, краевой угол смачивания составил 25°. При коррозионно-усталостных испытаниях на базе $2 \cdot 10^6$ циклов предел выносливости стали в агрессивной среде с добавкой тетраборфосфата калия повысился на 6,5 МПа по сравнению с раствором без ингибитора.

Обсуждение и заключение. Полученные результаты позволяют рекомендовать изученные тетраборфосфатные соединения, особенно тетраборфосфата калия, в качестве эффективных моюще-пассивирующих добавок к водным моющим растворам и составам для защиты от коррозии рабочих органов сельскохозяйственной техники в период межсезонного хранения. Это позволит обеспечить технологичность, экологичность и повышение долговечности техники.

Ключевые слова: ингибиторы коррозии, тетраборфосфаты, сталь 65Г, межсезонное хранение, синтетические моющие средства, коррозионная стойкость, краевой угол смачивания, коррозионная усталость

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Фадеев И.В., Успенский И.А., Чаткин М.Н., Юхин И.А., Петров С.Р., Казарин А.С. Тетраборфосфатные ингибиторы для защиты рабочих органов сельскохозяйственных машин от коррозии в процессе межсезонного хранения. *Инженерные технологии и системы*. 2026;36(2):416–432. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.26362.416-432>

Tetraphosphoric Acid Inhibitors for Protecting Agricultural Machinery Components Against Corrosion during Off-Season Storage

I. V. Fadeev^a✉, I. A. Uspensky^b, M. N. Chatkin^c,

I. A. Yukhin^b, S. R. Petrov^d, A. S. Kazarin^e

^a Chuvash I. Yakovlev State Pedagogical University, Cheboksary, Russian Federation, <https://ror.org/00x9nm172>

^b Ryazan State Agrotechnological University

named after P. A. Kostychev,

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

^c National Research Mordovia State University,

Saransk, Russian Federation, <https://ror.org/0262qgk29>

^d Chuvash State Agrarian University,

Cheboksary, Russian Federation

^e Independent Researcher,

Ryazan, Russian Federation

✉ ivan-fadeev-2012@mail.ru

Abstract

Introduction. The problem of corrosion damage to the working bodies of agricultural machinery during off-season storage remains a pressing one due to the ineffectiveness of traditional preservation methods. Solving this problem is necessary to reduce material losses, increase the service lifetime of equipment, and ensure uninterrupted operation during seasonal fieldwork.

Aim of the Study. The study is aimed at the theoretical and experimental substantiation for the use of alkali metal and ammonium tetraboron phosphates as highly effective corrosion inhibitors for protecting steel 65G.

Materials and Methods. The object of the study was steel 65G, which is used to manufacture the working bodies of agricultural machines. The inhibitory effect of the synthesized lithium, sodium, potassium, and ammonium tetraborophosphates was assessed using the gravimetric (according to GOST 9.908–85, VLA-200 g-M scales), electrochemical (potentiostat P-5848, three-electrode cell), and corrosion fatigue ($2 \cdot 10^6$ cycles) methods in a 3% NaCl solution.

Results. When potassium tetraborophosphate was added to a 3% NaCl solution, the corrosion rate of steel 65G was $4.2 \cdot 10^{-3} \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, while it was $44.6 \cdot 10^{-3} \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ in a solution without an inhibitor. According to electrochemical measurement data, the steel corrosion potential in the solution with potassium tetraborophosphate changed from -0.42 to -0.16 V. In the cleaning solution MS-8 with the addition of potassium tetraborophosphate ($5 \text{ kg}/\text{m}^3$) at a temperature of 60°C and a washing period of 6 minutes, the surface cleaning degree reached 88.9%, and the contact angle was 25° . In carrying out corrosion fatigue tests based on $2 \cdot 10^6$ cycles, the steel fatigue limit in an aggressive environment with potassium tetraborophosphate increased by 6.5 MPa compared to a solution without an inhibitor.

Discussions and Conclusion. The results obtained allow us to recommend the studied tetraboron phosphate compounds, particularly potassium tetraboron phosphate, as effective detergent-passivating additives to aqueous cleaning solutions and to corrosion protection compounds for agricultural machinery during off-season storage. This will ensure technological effectiveness, environmental friendliness, and increased lifetime of the equipment.

Keywords: corrosion inhibitors, tetraborophosphates, 65G steel, off-season storage, synthetic detergents, corrosion resistance, contact angle, corrosion fatigue

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

For citation: Fadeev I.V., Uspensky I.A., Chatkin M.N., Yukhin I.A., Petrov S.R., Kazarin A.S. Tetraborophosphate Inhibitors for Protecting Agricultural Machinery Components Against Corrosion during Off-Season Storage. *Engineering Technologies and Systems*. 2026;36(2):416–432. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.26362.416-432>

ВВЕДЕНИЕ

Агропромышленный комплекс является стратегически важной отраслью экономики Российской Федерации, обеспечивающей продовольственную безопасность государства. Эффективность его функционирования в значительной степени определяется технической оснащённостью и сохранностью парка сельскохозяйственных машин (СХМ) [1]. Особую роль в этом играет состояние наиболее уязвимых элементов – рабочих органов, к которым относятся лемеха плугов, лапы культиваторов, диски борон, сегменты косилок и другие детали, непосредственно контактирующие с абразивными и агрессивными средами [2]. Значительные разрушительные процессы происходят в периоды межсезонного хранения, когда техника подвергается интенсивному воздействию атмосферных осадков, конденсата, почвенных электролитов, оставшихся на поверхностях, и перепадов температур [3]. Именно в эти периоды развивается интенсивная атмосферная коррозия, понижается усталостная прочность металла, и все это приводит к преждевременному выходу деталей из строя в последующий период эксплуатации.

Традиционные способы консервации техники на период хранения (смазки, густые нефтяные составы, лакокрасочные покрытия) зачастую являются трудоёмкими, требуют специального оборудования для нанесения и, что критически

важно, последующего удаления перед началом работ. Многие из них недостаточно эффективны в условиях длительного воздействия агрессивных сред, адсорбируют влагу, склонны к стеканию и растрескиванию [1; 2]. Кроме того, процесс их удаления сопряжен с использованием органических растворителей, щелочных растворов и механических методов, что увеличивает трудоемкость подготовки техники к эксплуатационному сезону и негативно влияет на экологическую обстановку [4].

В связи с вышеизложенным, создание новых, высокоэффективных и технологичных способов защиты рабочих органов СХМ для условий межсезонного хранения представляет собой актуальную научно-практическую проблему. Наиболее перспективным направлением является разработка и внедрение ингибиторов коррозии, которые могут быть интегрированы в процессы обслуживания и консервации машин. Такие составы должны обладать комплексом свойств: высокой защитной эффективностью; способностью к адгезии и адсорбции на металлических поверхностях; хорошей проникающей способностью в зазоры и щели; простотой нанесения (методом распыления, окунания); легкостью удаления (например, водосмываемость) или, альтернативно, не требовать удаления перед эксплуатацией, выполняя функцию смазочного материала на начальном этапе эксплуатационного сезона.

Цель работы – теоретическое и экспериментальное обоснование применения новых тетраборфосфатных соединений (ТБФС) щелочных металлов и аммония в качестве высокоэффективных ингибиторов коррозии для защиты рабочих органов СХМ в процессе межсезонного хранения.

Для достижения поставленной цели необходимо проанализировать информацию по теме исследования и выбрать пути реализации; синтезировать и охарактеризовать тетраборфосфаты лития (ТБФЛ), натрия (ТБФН), калия (ТБФК) и аммония (ТБФА); оценить эффективность ингибирующего действия синтезированных тетраборфосфатов на коррозию стали 65Г в 3 %-м водном растворе NaCl гравиметрическим, электрохимическим и коррозионно-усталостным испытанием; изучить влияние присутствия ТБФС в водных растворах синтетических моющих средств (СМС) на степень очистки и краевого угол смачивания металлической поверхности при различной продолжительности мойки и температуре растворов.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Проблема защиты рабочих органов сельскохозяйственной техники от коррозии в условиях межсезонного хранения остается актуальной как в российской, так и в мировой научной среде. Традиционные методы консервации, такие как использование нефтяных смазок, лакокрасочных покрытий и восковых составов, обладают рядом существенных недостатков: трудоемкость нанесения и удаления, низкая экологичность, недостаточная долговечность и склонность к механическим повреждениям [1–4]. В связи с этим в последние десятилетия большое внимание уделяется разработке ингибиторов коррозии, интегрируемых в моющие и консервационные составы, что позволяет совмещать процессы очистки и защиты металлических поверхностей.

В отечественных исследованиях активно развиваются подходы к созданию комплексных ингибиторов на основе боратов и фосфатов. Так, ученые из Чувашии

показали высокую эффективность фосфатборатных соединений в нейтральных водных средах, подчеркнув их способность формировать на поверхности стали устойчивые пассивные пленки [5; 6]. Аналогичные результаты были получены при использовании дипинаконборатных [4; 7] и амидоборатных [8] соединений, которые демонстрируют выраженный анодный характер ингибирования и совместимость с СМС. Была обоснована целесообразность применения ингибиторов в составе моющих растворов для СХМ и акцентировано внимание на таких параметрах, как краевой угол смачивания, адгезия и водосмываемость [2; 9].

Зарубежные исследователи также уделяют значительное внимание разработке «зеленых» ингибиторов коррозии, в частности, на основе фосфатов и боратов. В этом направлении успешно работает коллектив ученых из Норвегии [10], который посвятил свои исследования современным фосфатсодержащим ингибиторам и подтвердил их высокую эффективность в нейтральных и слабощелочных средах, а также способность взаимодействовать с ионами железа с образованием защитных комплексов. С. Verma, E. E. Ebenso и M. A. Quraishi рассмотрели боратсодержащие ингибиторы и отметили их низкую токсичность, биоразлагаемость и совместимость с другими компонентами моющих составов, что делает их перспективными для промышленного применения [11]. При этом зарубежные авторы больше внимания уделяют органическим или гибридным (органико-неорганическим) ингибиторам, тогда как российские исследователи отдают предпочтение неорганическим солевым комплексам, в частности, тетраборфосфатам щелочных металлов и аммония [12–14].

Однако ряд вопросов в этой области все еще остается нерешенным. Во-первых, недостаточно изучено влияние таких соединений на коррозионно-усталостную прочность сталей, особенно в условиях циклических нагрузок, характерных для эксплуатации рабочих органов почвообрабатывающих и других СХМ [1; 3]. Во-вторых, отсутствуют системные данные о совместимости ингибиторов с различными типами СМС и их поведении при изменении температуры и pH [15; 16]. В-третьих, редко рассматривается применение ингибиторов именно в контексте межсезонного хранения СХМ, чаще речь идет о защите в промышленных системах охлаждения, нефтегазовой отрасли или транспорте [17–19].

Таким образом, несмотря на значительный прогресс в области разработки ингибиторов коррозии, актуальной остается задача создания моюще-пассивирующих составов, сочетающих высокую очищающую способность, низкий краевой угол смачивания, выраженный анодный характер ингибирования и положительное влияние на усталостную прочность металла. Именно на решение этой комплексной задачи направлено исследование тетраборфосфатов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Синтез и характеристика тетраборфосфатных соединений

В экспериментах использовали ТБФЛ брутто-формулы $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 2\text{Li}_3\text{PO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, ТБФН брутто-формулы $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 2\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, ТБФК брутто-формулы $\text{K}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot \text{K}_3\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ и ТБФА брутто-формулы $(\text{NH}_4)_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot (\text{NH}_4)_3\text{PO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$. Образование вышеперечисленных соединений установлено изучением боратных

водно-солевых систем методами физико-химического анализа [5; 14]. Тетраборфосфаты синтезировали по реакции совместной кристаллизации из водных растворов тетраборатов и фосфатов в стехиометрических соотношениях в 4 реакционных колбах (№1–4) емкостью по $0,002 \text{ м}^3$, в которые наливали по $0,0012 \text{ м}^3$ дистиллированной воды и вносили: в колбу №1 – 232 г (2 моля) фосфата лития и 170 г (1 моль) тетрабората лития, в колбу №2 – 328 г (2 моля) фосфата натрия и 170 г (1 моль) тетрабората натрия, в колбу №3 – 212 г (1 моль) фосфата калия и 234 г (1 моль) тетрабората калия, в колбу №4 – 149 г (1 моль) фосфата аммония и 192 г (1 моль) тетрабората аммония. Смеси непрерывно перемешивали в течение 6 часов при температуре $25 \text{ }^\circ\text{C}$ [5]. Приготовленные растворы переносили в кристаллизаторы для выращивания кристаллов.

Синтезированное соединение ТБФЛ (колба №1) представляет мелкокристаллическое вещество с выходом продукта 91–93 %, хорошо растворяется в воде. Для соединения $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 2\text{Li}_3\text{PO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ пикнометрическим методом определена плотность в бензоле и толуоле, которая равна в среднем $1,684 \text{ кг/м}^3$; его молекулярный объем равен $281,47 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{моль}$, удельный объем – $5,94 \times 10^{-4} \text{ м}^3/\text{кг}$. Показатели преломления кристаллов: N_g – 1,584 (наибольший показатель преломления); N_p – 1,456, (наименьший).

Соединение ТБФН (колба №2) представляет собой белый порошок, с выходом продукта 92–95 %, хорошо растворяется в воде. Для соединения $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 2\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ пикнометрическим методом определена плотность в бензоле и толуоле, равная в среднем $1,706 \text{ кг/м}^3$; его молекулярный объем равен $352,87 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{моль}$, удельный объем – $5,86 \times 10^{-4} \text{ м}^3/\text{кг}$. Показатели преломления кристаллов: N_g – 1,592; N_p – 1,451.

Соединение ТБФК (колба №3) кристаллизуется в виде гексагональных призм с выходом продукта 93–95 %, хорошо растворяется в воде. Для полученного соединения брутто-формулы $\text{K}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot \text{K}_3\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ определена плотность, которая равна $1,535 \text{ кг/м}^3$, а вычисленные молекулярный и удельный объемы соответственно равны $314,01 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{моль}$ и $6,52 \times 10^{-4} \text{ м}^3/\text{кг}$. Показатели преломления кристаллов: N_g – 1,552; N_p – 1,475.

Соединение ТБФА брутто-формулы $(\text{NH}_4)_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot (\text{NH}_4)_3\text{PO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (колба №4) кристаллизуется в виде тонких прозрачных игл с выходом продукта 92–94 %, хорошо растворяется в воде. Его плотность – $1,460 \text{ кг/м}^3$; молекулярный объем равен $282,88 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{моль}$, удельный объем – $6,85 \times 10^{-4} \text{ м}^3/\text{кг}$. Показатели преломления кристаллов: N_g – 1,607; N_p – 1,483.

Методика электрохимических испытаний

Исследования влияния ТБФС на противокоррозионную устойчивость высокоуглеродистой стали 65Г, которая широко используется в конструкциях рабочих органов почвообрабатывающих машин [3], периодически подвергаемых консервации при межсезонном и зимнем хранении, проводили следующим образом. Сначала определили оптимальную концентрацию ТБФС в коррозионно-активной среде (3 %-й водный раствор NaCl) по максимальному смещению потенциала активации стали 65Г в потенциостатическом режиме поляризации. Данная информация была получена путем измерения стационарных потенциалов высокоомным вольтметром потенциостата П-5848.

Эксперимент был проведен в соответствии с разработанной методикой электрохимических испытаний [18; 19].

Методика гравиметрических испытаний и коррозионно-усталостных испытаний

Гравиметрические исследования скорости коррозии стали проводили на основании описанной методики [2; 5]. Образцы из стали 65Г погружали в 3 %-е водные растворы хлорида натрия без ингибиторов и ингибированных ТБФС. После этого они выдерживались в течение 10 часов при температуре 70–80 °С, извлекались из раствора и оставлялись в воздухе на 24 часа. Это составляло один цикл испытаний. Испытания проводились в течение 5 циклов (120 часов). После каждого цикла 3 опытных образца обрабатывали, взвешивали на аналитических весах ВЛА-200 г-М с точностью до 0,0005 г с последующей обработкой результатов по ГОСТ 9.908–851 ($n = 5$, доверительная вероятность 95 %) и вычисляли скорость коррозии [17; 19].

Коррозионно-усталостные испытания проводили на базе $N = 2 \cdot 10^6$ циклов [18].

Методика изучения влияния тетраборфосфатных соединений на краевой угол смачивания и степень очистки металлической поверхности

Современные антикоррозионные и консервационные составы для СХМ должны иметь надежную адгезию. Одним из ключевых факторов, определяющих величину адгезии, особенно на молекулярном уровне, является смачиваемость. Мерой смачивания поверхности является краевой угол смачивания, который образуется между поверхностями жидкого и твердого веществ в точке соприкосновения фаз [9]. В связи с этим изучено влияние присутствия ТБФС в количестве 5 кг/м³ в 3 %-х водных растворах СМС МС-8 на краевой угол смачивания и степень очистки металлической поверхности при различной продолжительности мойки и температуре растворов. Краевой угол смачивания раствора определяли на кварцевой пластине. Каплю связующего раствора размером 1–2 мм формировали с помощью кварцевого капилляра. Измерения контактного угла с точностью $\pm 1^\circ$ проводили катетометром КМ-6 с угломерной головкой [9]. Опыты по влиянию ТБФС на краевой угол смачивания и степень очистки металлической поверхности проводили по известной и широко применяемой в научных экспериментах методике [17]. Для каждой точки эксперимента опыты проводились с трехкратной повторностью.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

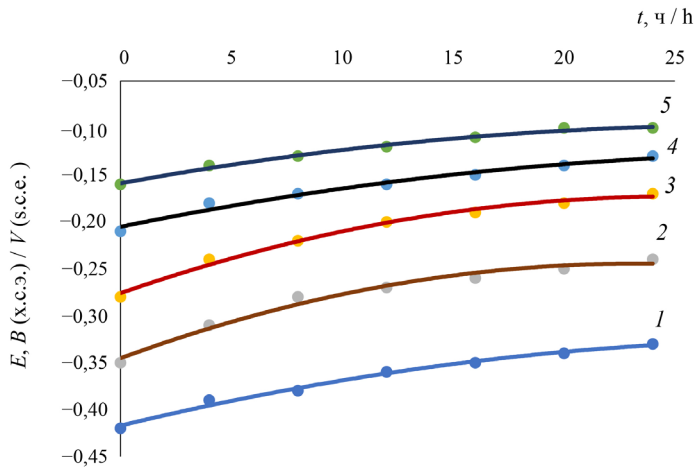
Исследования влияния тетраборфосфатных соединений на противокоррозионную устойчивость стали 65Г

Электрохимические исследования показали, что без внешней поляризации стационарный потенциал стали в 3 %-м растворе хлорида натрия со временем снижается и через 30 минут принимает значения $-0,42$ В. Добавление тетраборфосфатов в коррозионно-активную среду способствует повышению потенциала стали, и при концентрации 0,5 % в расчете на безводную соль их значения равны: в 3 %-м растворе NaCl + ТБФЛ – ($-0,35$ В); в 3 %-м растворе NaCl + ТБФА – ($-0,28$ В);

¹ ГОСТ 9.908-85. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200007383> (дата обращения: 03.06.2025).

в 3 %-м растворе NaCl + ТБФН – (–0,21 В); в 3 %-м растворе NaCl + ТБФК – (–0,16 В). Увеличение концентрации ТБФС свыше 0,5 % не приводит к существенному изменению стационарного потенциала стального образца. По этой причине дальнейшие эксперименты по изучению скорости коррозии стали 65Г в испытуемых растворах проводились при 0,5 %-й массовой концентрации ТБФС.

Введение ТБФС в 3 %-й раствор NaCl приводит к заметному повышению коррозионной стойкости стали. Установлено, что электродные потенциалы стали 65Г через 24 часа приобретают значения более положительные в ингибированных растворах, по сравнению с чистым 3 %-м водным раствором хлорида натрия (рис. 1), а по пассивирующему действию ТБФС располагаются в следующей последовательности: ТБФК > ТБФН > ТБФА > ТБФЛ.



Р и с. 1. Изменение во времени стационарного потенциала стали 65Г в 3 %-м водном растворе NaCl:

1 – в чистом растворе; 2 – с добавлением 5 кг/м³ ТБФЛ; 3 – с добавлением 5 кг/м³ ТБФА; 4 – с добавлением 5 кг/м³ ТБФН; 5 – с добавлением 5 кг/м³ ТБФК

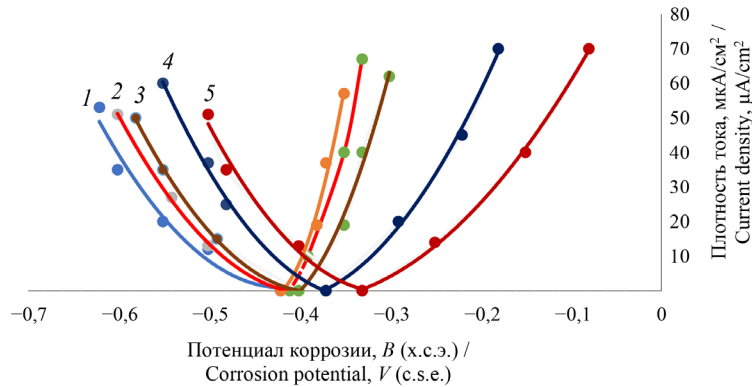
F i g. 1. Changes in time of the steady state potential of steel 65G in a 3% NaCl aqueous solution:

1 – in clear solution; 2 – with the addition of 5 kg/m³ lithium tetraborophosphate; 3 – with the addition of 5 kg/m³ ammonium tetraborophosphate; 4 – with the addition of 5 kg/m³ sodium tetraborophosphate; 5 – with the addition of 5 kg/m³ potassium tetraborophosphate

Источники: рисунки 1–3 составлены авторами статьи в Microsoft Excel.

Source: the figures 1–3 were made by the authors of the article Microsoft Excel.

В ходе эксперимента потенциостатическим методом получены поляризационные кривые в испытуемых растворах при прямом и обратном ходе замеров, которые представлены в координатах « $E - i$ » (потенциал – плотность тока) (рис. 2). В присутствии ТБФС в 3 %-м растворе NaCl (кривые 2–5) потенциалы коррозии металла смещены в положительную сторону относительно потенциала коррозии $E_{кор.}$ в фоновом электролите (кривая 1). При этом ТБФК характеризуется большей ингибирующей способностью, чем ТБФН, ТБФА и ТБФЛ.



Р и с. 2. Анодные и катодные потенциодинамические поляризационные кривые стали 65Г в 3 %-м водном растворе NaCl:

1 – в чистом растворе; 2 – с добавлением 5 кг/м³ ТБФЛ; 3 – с добавлением 5 кг/м³ ТБФА; 4 – с добавлением 5 кг/м³ ТБФН; 5 – с добавлением 5 кг/м³ ТБФК

F i g. 2. Anodic and cathodic potentiodynamic polarization curves of 65G steel in 3% aqueous NaCl solution:

1 – in clear solution; 2 – with the addition of 5 kg/m³ lithium tetraborophosphate; 3 – with the addition of 5 kg/m³ ammonium tetraborophosphate; 4 – with the addition of 5 kg/m³ sodium tetraborophosphate; 5 – with the addition of 5 kg/m³ potassium tetraborophosphate

Исследования влияния тетраборфосфатных соединений на скорость коррозии стали 65Г

Скорость коррозии стали после 24 и 120 часов испытания в 3 %-м водном растворе NaCl составила $44,6 \cdot 10^{-3}$ и $32,8 \cdot 10^{-3}$ г/м²·ч, соответственно. ТБФС понижают скорость коррозии стали в 3 %-м водном растворе хлорида натрия. Скорость коррозии через 24 ч испытания в присутствии ТБФЛ равна $30,4 \cdot 10^{-3}$ г/м²·ч; через 120 ч – $25,6 \cdot 10^{-3}$ г/м²·ч. В присутствии ТБФН – $14,6 \cdot 10^{-3}$ и $7,8 \cdot 10^{-3}$ г/м²·ч; в присутствии ТБФК – $9,2 \cdot 10^{-3}$ и $4,2 \cdot 10^{-3}$ г/м²·ч; в присутствии ТБФА – $20,2 \cdot 10^{-3}$ и $13,7 \cdot 10^{-3}$ г/м²·ч.

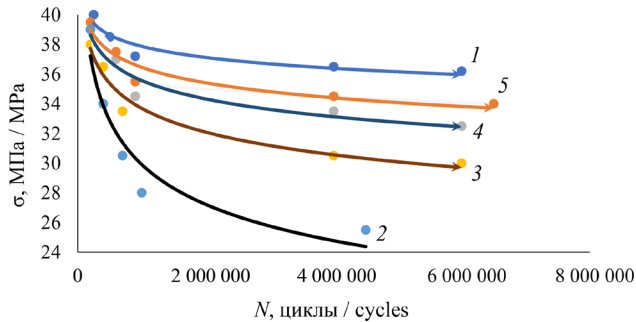
Значения pH растворов в исследуемых средах измерены.

Исследование влияния тетраборфосфатных соединений на коррозионно-усталостную прочность стали 65Г

Уменьшение циклической прочности стали вызывается разрушениями, связанными с чисто коррозионными и коррозионно-механическими поражениями. Наличие ингибитора в коррозионной среде может оказывать влияние на оба разрушающих фактора, вызывающих снижение прочности металла. На рисунке 3 представлены результаты усталостных и коррозионно-усталостных исследований стали в воздухе и растворах МС-8, проведенных по разработанной методике [15; 18].

Приведенные данные указывают на то, что суммарная потеря циклической прочности стали 65Г в 3 %-м растворе NaCl на базе испытания $N = 2\,000\,000$ циклов составляет 9,9 МПа (кривые 1 и 2). Из них 6,6 МПа приходится на чисто коррозионные поражения и 3,3 МПа на коррозионно-механические (кривые 1, 2 и 3). Добавка ТБФК в 3 %-й раствор NaCl увеличивает циклическую прочность стали (сравнение кривых 2 и 3). Данный эффект обусловлен снижением действия разрушающих факторов на уменьшение циклической прочности металла (кривые 1, 3 и 5). На данной

базе испытания ТБФК в большей мере уменьшает разрушающее действие коррозионных поражений и в меньшей – коррозионно-механических.



Р и с. 3. Кривые усталости и коррозионной усталости стали 65Г:

- 1 – в воздухе; 2 – в 3 %-м растворе NaCl; 3 – в 3 %-м растворе NaCl + ТБФК 5 кг/м³;
 4 – в воздухе после предварительной выдержки в 3 %-м растворе NaCl;
 5 – в воздухе после предварительной выдержки в 3 %-м растворе NaCl + ТБФК 5 кг/м³;

F i g. 3. Fatigue and corrosion fatigue curves for steel 65G:

- 1 – in air; 2 – in a 3 % NaCl solution; 3 – in a 3 % NaCl + PTBP solution 5 kg/ m³;
 4 – in air after preliminary exposure to a 3 % NaCl solution;
 5 – in air after preliminary exposure to a 3 % NaCl + PTBP solution 5 kg/m³

Проведенные электрохимические и гравиметрические измерения позволили количественно сопоставить защитную эффективность всех четырех синтезированных тетраборфосфатных соединений. Для каждого из них были зафиксированы значения стационарного потенциала и скорости коррозии стали 65Г в 3 %-м растворе хлорида натрия. Полученные данные свидетельствуют о том, что введение тетраборфосфатов изменяет кинетику электродных процессов на поверхности металла. Наибольшее смещение потенциала в положительную сторону и минимальная скорость коррозии зафиксированы в присутствии тетраборфосфата калия. Этот результат рассматривается как наиболее значимый для последующей разработки технологических составов.

Однако эффективность консервации определяется не только способностью ингибитора тормозить коррозию, но и его совместимостью с моющими средствами. Поверхность рабочих органов сельскохозяйственных машин перед закладкой на хранение требует обязательной очистки от загрязнений. В связи с этим были проведены дополнительные эксперименты по оценке моющей способности 3 %-х водных растворов синтетического моющего средства МС 8, содержащих добавки тетраборфосфатов. В ходе испытаний варьировали температуру раствора от 20 до 80 °С и продолжительность мойки от 2 до 8 минут. Для каждого режима определяли степень очистки стальных образцов и краевой угол смачивания. Именно эти параметры характеризуют способность раствора удалять загрязнения и равномерно смачивать поверхность, что критически важно для формирования защитной пленки.

В таблице представлены экспериментальные данные исследования влияния присутствия ТБФС в количестве 5 кг/м³ в 3 %-х водных растворах СМС МС-8 на степень очистки и краевой угол смачивания поверхности образцов при различной продолжительности мойки и температуре растворов.

Таблица
Table

Влияние ТБФС в количестве 5 кг/м³ на степень очистки и краевой угол смачивания при различных значениях продолжительности мойки и температуры 3 %-х водных растворов МС-8
The effect of tetraborophosphate compounds at 5 kg/m³ on the cleaning efficiency and contact angle of 3% aqueous solutions of MS-8 at different washing periods and temperatures

Температура раствора, °С / Solution temperature, °C	Продолжительность мойки, мин. / Washing period, min.	3 %-й водный раствор МС-8 (контроль) / 3% aqueous solution of MS-8 (control)		3 %-й водный раствор МС-8 с добавкой ТБФС в количестве 5 кг/м ³ / 3% aqueous solution of MS-8 with the addition of tetraborophosphate at a rate of 5 kg/m ³		ТБФЛ / Lithium tetraborophosphate		ТБФН / Sodium tetraborophosphate		ТББК / Potassium tetraborophosphate		ТБФА / Ammonium tetraborophosphate	
		Степень очистки, % / Degree of purification, %	Краевой угол смачивания θ, ° / Contact angle θ, °	Степень очистки, % / Degree of purification, %	Краевой угол смачивания θ, ° / Contact angle θ, °	Степень очистки, % / Degree of purification, %	Краевой угол смачивания θ, ° / Contact angle θ, °	Степень очистки, % / Degree of purification, %	Краевой угол смачивания θ, ° / Contact angle θ, °	Степень очистки, % / Degree of purification, %	Краевой угол смачивания θ, ° / Contact angle θ, °	Степень очистки, % / Degree of purification, %	Краевой угол смачивания θ, ° / Contact angle θ, °
20	2	29,3	56	38,2	51	48,4	43	51,8	40	36,2	54		
	4	35,4	52	46,1	48	54,8	42	62,5	38	40,1	51		
	6	48,3	49	55,8	42	63,9	40	68,9	36	45,8	48		
	8	51,1	46	56,1	40	64,8	38	71,6	35	50,1	46		
40	2	32,5	54	41,2	47	58,3	40	61,8	37	38,2	50		
	4	40,6	51	52,5	43	64,8	37	67,5	34	46,1	49		
	6	54,2	46	66,8	39	73,9	34	78,9	31	55,8	45		
	8	62,4	41	68,1	38	75,8	32	79,6	29	60,4	43		
60	2	44,7	50	50,2	44	68,3	38	74,8	34	41,2	49		
	4	51,2	46	58,5	40	74,8	35	79,5	30	50,1	45		
	6	63,8	40	74,8	36	79,9	32	88,9	25	63,8	40		
	8	71,3	32	76,1	34	81,8	30	89,6	24	65,4	39		
80	2	38,8	51	45,2	49	59,3	42	60,8	39	37,2	49		
	4	44,3	49	50,5	45	63,8	40	64,5	35	43,1	47		
	6	54,2	47	61,8	41	71,9	36	71,9	32	51,8	45		
	8	53,0	48	61,1	39	70,8	35	70,6	32	50,4	46		

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные экспериментальные данные подтверждают, что тетраборфосфатные соединения, особенно ТБФК, эффективно снижают скорость коррозии стали 65Г в нейтральных хлоридсодержащих средах. Снижение скорости коррозии с $44,6 \cdot 10^{-3}$ до $4,2 \cdot 10^{-3}$ г/м²·ч и смещение стационарного потенциала в положительную сторону (с $-0,42$ до $-0,16$ В) свидетельствуют о преимущественно анодном механизме ингибирования, что согласуется с ранее опубликованными данными [5; 6] для фосфатборатных соединений.

Сопоставление с результатами других исследований [10; 11] показывает, что неорганические боратфосфатные комплексы не уступают по эффективности некоторым «зеленым» органическим ингибиторам, а по технологичности и стабильности в моющих растворах превосходят их. Выявленная последовательность пассивирующего действия (ТБФК > ТБФН > ТБФА > ТБФЛ) коррелирует с буферной емкостью и способностью формировать плотные феррогидроксотетраборфосфатные пленки на поверхности металла.

Из данных исследования влияния ТБФС на скорость коррозии стали 65Г следует, что ТБФК в большей степени тормозит скорость коррозии.

Измерение значений pH растворов показало, что бораты натрия обладают буферным действием, и при разбавлении концентрация водородных ионов остается практически неизменной. Наибольшую ингибирующую способность ТБФК можно объяснить более сильным подщелачиванием раствора и его наибольшей буферной емкостью, которая позволяет регулировать, а также поддерживать необходимое значение pH раствора. Ингибирующий эффект ТБФК, по-видимому, связан не только с увеличением концентрации гидроксид-ионов, но и с образованием на поверхности металла более плотной пассивной феррогидроксотетраборфосфатной пленки. Вероятнее всего полярные молекулы ТБФС адсорбируются на поверхности корродирующего металла электростатически за счет кулоновских сил.

Результаты коррозионно-усталостных испытаний позволяют утверждать, что ТБФС повышают циклическую прочность стали, снижая действие разрушающих факторов и таким образом увеличивают коэффициент запаса циклической прочности углеродистой стали в агрессивных водных растворах. Такое действие ТБФС можно объяснить его влиянием на кинетику электродных процессов специфических пар Эванса, с работой которых связаны чисто коррозионные и коррозионно-механические разрушения [15; 18].

Из данных таблицы видно, что 3 %-е водные растворы синтетического моющего средства МС-8 с добавкой тетраборфосфатных соединений в количестве 5 кг/м³ обладают высокой степенью очистки и небольшим значением краевого угла смачивания металлической поверхности, что соответствует требованиям практического применения антикоррозионных и консервационных составов. При этом значения степени очистки увеличиваются с повышением температуры раствора от 20 до 80 °С. В интервале температур раствора от 60 до 80 °С происходит уменьшение моющих свойств тетраборфосфатных растворов. Данное явление можно объяснить выделением в раствор молекул коллоидных частиц, что

в итоге приводит к уменьшению концентрации компонентов раствора и ухудшению моющего свойства. Наибольшим моющим эффектом обладает 3 %-й водный раствор МС-8 в присутствии ТБФК в количестве 5 кг/м³ при температуре 60 °С и продолжительности мойки 6 минут.

Ограничением исследования является проведение экспериментов только на одной марке стали (65Г) и в одной коррозионной среде (3 % NaCl), что не полностью охватывает многообразие условий межсезонного хранения СХМ. Сильной стороной работы является комплексное применение гравиметрических, электрохимических и коррозионно-усталостных методов, а также изучение моющих свойств и смачиваемости, что позволило оценить пригодность ТБФС для совмещенных процессов очистки и пассивации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Синтезированные тетраборфосфаты лития, натрия, калия и аммония эффективно снижают скорость коррозии стали 65Г в 3 %-м растворе NaCl, а по пассивирующему действию располагаются в последовательности: ТБФК > ТБФН > ТБФА > ТБФЛ. Наибольшую эффективность показал тетраборфосфат калия, обеспечивающий снижение скорости коррозии в 10,6 раза.

Новизна работы заключается в экспериментальном подтверждении возможности совместного использования ТБФС в моющих растворах синтетического моющего средства МС-8, где они одновременно улучшают очистку (до 88,9 %) и снижают краевой угол смачивания (до 25°) при 60 °С и 6-минутной мойке, а также повышают циклическую прочность стали на 6,5 МПа за счет подавления чисто коррозионных разрушений.

Практическая значимость работы состоит в обосновании рекомендаций по применению тетраборфосфатов, особенно ТБФК, в качестве эффективных моюще-пассивирующих добавок к водным растворам для защиты рабочих органов сельскохозяйственных машин в период межсезонного хранения. Перспективой исследования является изучение защитного действия ТБФС на другие конструкционные стали в реальных условиях хранения техники, а также разработка технологических регламентов их применения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бышов Н.В., Борычев С.Н., Успенский И.А., Фадеев И.В. Разработка нового средства для защиты сельскохозяйственных машин при хранении. *Техника и оборудование для села*. 2019;(6):38–42. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2019-6-38-42>
2. Фадеев И.В., Успенский И.А., Ушанев А.И., Степанова Е.И., Воронов В.П. Повышение эффективности технологии нанесения противокоррозионного состава при постановке сельскохозяйственных машин на хранение. *Техника и оборудование для села*. 2022;(1):39–42. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2022-1-39-42>
3. Садетдинов Ш.В., Пестряева Л.Ш., Фадеев И.В., Пестряев Д.А. Повышение коррозионной стойкости углеродистой стали с помощью дипинаконборатных соединений. *Черные металлы*. 2020;(11):40–45. <https://doi.org/10.17580/chm.2020.11.06>
4. Илларионов И.Е., Гильманшина Т.Р., Жирков Е.Н., Стрельников И.А., Садетдинов Ш.В. Исследование влияния боратфосфатов на свойства графитовых противопопригарных покрытий.

- Литейщик России*. 2022;(4):34–37. URL: <http://www.ruscastings.ru/work/396/6988/9882> (дата обращения: 15.07.2025).
5. Фадеев И.В., Новоселов А.М., Садетдинов Ш.В. Теоретические основы разработки новых ингибиторов коррозии для автотранспортного комплекса. *Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ)*. 2014;(4):17–21. URL: <https://madi.ru/1636-vestnik-moskovskogo-atomobilno-dorozhno-gosudarstvennogo.html> (дата обращения: 15.07.2025).
 6. Илларионов И.Е., Садетдинов Ш.В., Стрельников И.А., Гартфельдер В.А. Влияние фосфатборатных соединений на противокоррозионную устойчивость углеродистой стали в нейтральных водных средах. *Черные металлы*. 2018;(5):47–53. URL: <https://www.rudmet.ru/journal/1721/article/29533/?language=ru> (дата обращения: 15.07.2025).
 7. Смирнов А.Г., Максимов И.И., Калимуллин М.Н. Использование биоразлагаемых материалов для защиты сельскохозяйственной техники от коррозии. *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2025;20(1):75–81. <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2025-1-75-81>
 8. Илларионов И.Е., Жирков Е.Н., Пестряев Д.А., Садетдинов Ш.В. Разработка торфосодержащих смесей для теплоизоляции приливов отливок с использованием аминокислотных комплексов. *Заготовительные производства в машиностроении*. 2021;19(11):483–486. <https://doi.org/10.36652/1684-1107-2021-19-11-483-486>
 9. Бышов Н.В., Успенский И.А., Алексеев В.В., Фадеев И.В. Изменение контактных углов смачивания при добавлении в моющие растворы поверхностно-активных веществ. *Инженерные технологии и системы*. 2019;29(2):295–305. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.295-305>
 10. Thomas P., Sahoo B.N., Thomas P.J., Greve M.M. Recent Advances in Emerging Integrated Anticorrosion and Antifouling Nanomaterial-Based Coating Solutions. *Environmental Science and Pollution Research*. 2024;(31):67550–67576. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33825-6>
 11. Verma C., Ebenso E.E., Quraishi M.A. Ionic liquids As Green and Sustainable Corrosion Inhibitors for Metals and Alloys: An Overview. *Journal of Molecular Liquids*. 2017;(233):403–414. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.02.111>
 12. Стрельников И.А., Пестряев Д.А., Садетдинов Ш.В. Влияние дипинаконборатов на коррозионную стойкость стали Ст3 в растворах синтетических моющих средств. *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2021;17(3):131–134. <https://doi.org/10.36652/1813-1336-2021-17-3-131-134>
 13. Илларионов И.Е., Стрельников И.А., Садетдинов Ш.В. Моисеева О.В., Королев А.В. Влияние борной кислоты на свойства теплоизоляционных смесей. *Литейное производство*. 2019;(1):24–26. <https://www.elibrary.ru/ysgyel>
 14. Стрельников И.А., Пестряев Д.А., Садетдинов Ш.В. Модифицирование технических лигносульфонатов некоторыми аминокислотными комплексами. *Литейное производство*. 2021;(2):20–22. <https://www.elibrary.ru/veuxtp>
 15. Стрельников И.А., Пестряев Д.А., Садетдинов Ш.В. Коррозионные характеристики углеродистой стали в растворах синтетических моющих средств. *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2020;16(3):112–115. <https://doi.org/10.36652/1813-1336-2020-16-3-112-115>
 16. Смирнов А.Г., Гордеев А.А., Семенов А.В. Исследование коррозионной активности формиата натрия и бишофита в составе комплексного противогололедного материала по отношению к оцинкованным покрытиям стальных деталей. *Вестник Чувашского ГАУ*. 2025;(1):214–220. <https://doi.org/10.48612/vch/anh9-fb88-51kb>
 17. Илларионов И.Е., Садетдинов Ш.В. Коррозия черных металлов в средах, имитирующих условия эксплуатации автомобилей. *Черные металлы*. 2019;(4):67–72. URL: <https://www.rudmet.ru/journal/1813/article/30950/> (дата обращения: 13.08.2025).
 18. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Оценка вероятности возникновения электрохимической коррозии при формировании микроплазменных оксидных покрытий. *Вестник Тверского*

государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2025;(3):5–15. <https://doi.org/10.46573/2658-5030-2025-3-5-15>

19. Шемякин А.В., Стекольников Ю.А., Успенский И.А., Юхин И.А., Фомин С.Д., Пухов Е.В. и др. Гальванические покрытия Fe-Ni-p для восстановления изношенных деталей сельскохозяйственной техники и технологического оборудования. *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование*. 2024;(3):302–309. <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2024-03-35>

REFERENCES

1. Byshov N.V., Borychev S.N., Uspensky I.A., Fadeev I.V. Development of New Means to Protect Agricultural Machinery During the Storage. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2019;(6):38–42. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2019-6-38-42>
2. Fadeev I.V., Uspensky I.A., Ushanev A.I., Stepanova E.I., Voronov V.P. Increasing the Efficiency of Anti-Corrosion Application Technology When Delivering Agricultural Machines for Storage. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2022;(1):39–42. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2022-1-39-42>
3. Sadetdinov Sh.V., Pestryaeva L.Sh., Fadeev I.V., Pestryaev D.A. Increasing the Corrosion Resistance of Carbon Steel by Means of Dipinaconborate Compounds. *Chernye Metally*. 2020;(11):40–45. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.17580/chm.2020.11.06>
4. Illarionov I.E., Gilmanshina T.R., Zhirkov E.N., Strelnikov I.A., Sadetdinov Sh.V. Investigation of the Effect of Boratophosphates on Properties of Graphite Non-Stick Coatings. *Russian Foundryman*. 2022;(4):34–37. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <http://www.ruscastings.ru/work/396/6988/9882> (accessed 15.07.2025).
5. Fadeev I.V., Novoselov A.M., Sadetdinov Sh.V. Theoretical Foundations of the Development of New Corrosion Inhibitors for the Motor Complex. *Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI) Bulletin*. 2014;(4):17–21. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://madi.ru/1636-vestnik-moskovskogo-avtomobilno-dorozhnogo-gosudarstvennogo.html> (accessed 15.07.2025).
6. Illarionov I.E., Sadetdinov Sh.V., Strelnikov I.A., Gartfelder V.A. [Influence of Phosphate Borate Compounds on Anti-Corrosion Stability of Carbon Steel in Neutral Water Environments]. *Chernye Metally*. 2018;(5):47–53. (In Russ.) Available at: <https://www.rudmet.ru/journal/1721/article/29533/?language=ru> (accessed: 15.07.2025).
7. Smirnov A.G., Maksimov I.I., Kalimullin M.N. Using Biodegradable Materials to Protect Agricultural Machinery from Corrosion. *Vestnik of Kazan State Agrarian University*. 2025;20(1):75–81. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2025-1-75-81>
8. Illarionov I.E., Zhirkov E.N., Pestryaev D.A., Sadetdinov Sh.V. Development of Peat-Containing Mixtures for Thermal Insulation of Casting Heads Using Aminoborate Complexes. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii*. 2021;19(11):483–486. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.36652/1684-1107-2021-19-11-483-486>
9. Byshov N.V., Uspensky I.A., Alekseev V.V., Fadeev I.V. Changing the Contact Wetting Angles When Adding Surface-Active Substances to Washing Solutions. *Engineering Technologies and Systems*. 2019;29(2):295–305. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.295-305>
10. Thomas P., Sahoo B.N., Thomas P.J., Greve M.M. Recent Advances in Emerging Integrated Anticorrosion and Antifouling Nanomaterial-Based Coating Solutions. *Environmental Science and Pollution Research*. 2024;(31):67550–67576. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33825-6>
11. Verma C., Ebenso E.E., Quraishi M.A. Ionic liquids As Green and Sustainable Corrosion Inhibitors for Metals and Alloys: An Overview. *Journal of Molecular Liquids*. 2017;(233):403–414. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.02.111>
12. Strelnikov I.A., Pestryaev D.A., Sadetdinov Sh.V. Influence of Dipinaconborates on the Corrosion Resistance of St3 Steel in Synthetic Detergent Solutions. *Hardening Technologies and Coatings*. 2021;17(3):131–134. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.36652/1813-1336-2021-17-3-131-134>

13. Ilarionov I.E., Strelnikov I.A., Sadetdinov Sh.V., Moiseeva O.V., Korolev A.V. Influence of Boric Acid on Characteristics of Thermal Insulation Mixtures. *Foundry. Technology and Equipment*. 2019;(1):24–26. (In Russ., abstract in Eng.) <https://www.elibrary.ru/ysgycl>
14. Strelnikov I.A., Pestryaev D.A., Sadetdinov Sh.V. Modification of Technical Lignosulfonates with Some Aminoborate Complexes. *Foundry. Technology and Equipment*. 2021;(2):20–22. (In Russ., abstract in Eng.) <https://www.elibrary.ru/veuxtp>
15. Strelnikov I.A., Pestryaev D.A., Sadetdinov Sh.V. Corrosion Characteristics of Carbon Steel in Solutions of Synthetic Detergents. *Strengthening Technologies and Coatings*. 2020;16(3):112–115. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.36652/1813-1336-2020-16-3-112-115>
16. Smirnov A.G., Gordeev A.A., Semenov A.V. Study of Corrosion Activity of Sodium Formate and Bischofite as Part of Complex Anti-Icing Material in Relation to Galvanized Coatings of Steel Parts. *Vestnik Chuvash SAU*. 2025;(1):214–220. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.48612/vch/anh9-fb88-51kb>
17. Ilarionov I.E., Sadetdinov Sh.V. Corrosion of Ferrous Metals in Environments Imitated the Conditions of Vehicles Operation. *Chernye Metally*. 2019;(4):67–72. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://www.rudmet.ru/journal/1813/article/30950/> (accessed 13.08.2025).
18. Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O. Assessment of the Probability of Electrochemical Corrosion During the Formation of Microplasma Oxide Coatings. *Vestnik TvSTU. Series: Technical Sciences*. 2025;(3):5–15. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.46573/2658-5030-2025-3-5-15>
19. Shemyakin A.V., Stekolnikov Yu.A., Uspensky I.A., Yukhin I.A., Fomin S.D., Pukhov E.V., et al. Fe-Ni-P Galvanic Coatings for Restoration of Worn Parts of Agricultural Machinery and Technological Equipment. *Proceedings of Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Education*. 2024;(3):302–309. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2024-03-5>

Об авторах:

Фадеев Иван Васильевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технических дисциплин Чувашского государственного педагогического университета имени И. Я. Яковлева» (428003, Российская Федерация, г. Чебоксары, ул. К. Маркса, д. 38), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5863-1812>, Researcher ID: B-8856-2019, ivan-fadееv-2012@mail.ru

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

Чаткин Михаил Николаевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А. И. Лещанкина Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3758-7066>, Researcher ID: O-7004-2018, chatkinm@yandex.ru

Юхин Иван Александрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автотракторной техники и теплоэнергетики Рязанского государственного агротехнологического университета имени П. А. Костычева (390044, Российская Федерация, г. Рязань, ул. Костычева, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3822-0928>, Researcher ID: Q-8188-2017, yuival@rambler.ru

Петров Станислав Робертович, магистрант Чувашского государственного аграрного университета (428003, Российская Федерация, г. Чебоксары, ул. К. Маркса, д. 29), ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-0639-4274>, Researcher ID: OMM-3236-2025, staspetrov21@mail.ru

Казарин Александр Сергеевич, независимый исследователь, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0507-8563>, Researcher ID: ONJ-2793-2025, frady@inbox.ru

Вклад авторов:

И. В. Фадеев – контроль, лидерство и наставничество в процессе планирования и проведения исследования; формулирование замысла идеи исследования, целей и задач.

И. А. Успенский – разработка методологии исследования; осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор данных.

М. Н. Чаткин – разработка методологии исследования; осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор данных.

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

С. Р. Петров – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор данных.

А. С. Казарин – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 24.10.2025; поступила после рецензирования 18.11.2025;
принята к публикации 24.11.2025*

About the authors:

Ivan V. Fadeev, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of Mechanical Engineering Chair, Chuvash I. Yakovlev State Pedagogical University (38 K. Marksa St., Cheboksary 428003, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5863-1812>, Researcher ID: B-8856-2019, ivan-fadeev-2012@mail.ru

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

Mikhail N. Chatkin, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Leshchankin Chair of Mobile Power Tools and Agricultural Machinery, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3758-7066>, Researcher ID: O-7004-2018, chatkinm@yandex.ru

Ivan A. Yukhin, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Automotive and Tractor Engineering and Thermal Power Engineering, Ryazan State Agrotechnological University named after P. A. Kostychev (1 Kostycheva St., Ryazan 390044, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3822-0928>, Researcher ID: Q-8188-2017, yuival@rambler.ru

Stanislav R. Petrov, Master's student, Chuvash State Agrarian University (29 K. Marksa St., Cheboksary 428003, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-0639-4274>, Researcher ID: OMM-3236-2025, staspetrov21@mail.ru

Alexander S. Kazarin, Independent Researcher, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0507-8563>, Researcher ID: ONJ-2793-2025, frady@inbox.ru

Contribution of the authors:

I. V. Fadeev – oversight and leadership responsibility for the study activity planning and executing, including mentorship external to the core team; formulating the study ideas, aims and objectives.

I. A. Uspensky – developing the study methodology; conducting the study, specifically performing the experiments, or collecting data.

M. N. Chatkin – developing the study methodology; conducting the study, specifically performing the experiments, or collecting data.

I. A. Yukhin – conducting the study, specifically performing the experiments, or collecting data.

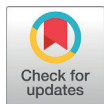
S. R. Petrov – conducting the study, specifically performing the experiments, or collecting data.

A. S. Kazarin – conducting the study, specifically performing the experiments, or collecting data.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 24.10.2025; revised 18.11.2025; accepted 24.11.2025

МАШИНОСТРОЕНИЕ / MECHANICAL ENGINEERING



<https://doi.org/10.15507/2658-4123.26362.433-447>

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

УДК / UDK 621.941

Оригинальная статья / Original article

Трибологические свойства фрез, работающих в условиях сплошного резания

С. А. Плотников, А. С. Клуонис✉

Вятский государственный университет,

г. Киров, Российская Федерация, <https://ror.org/01anxqg21>

✉ alexanderklunionis@gmail.com

Аннотация

Введение. На протяжении всего периода развития в машиностроении особое внимание уделяется производству и совершенствованию режущих инструментов. Современные методы нанесения на них покрытий обеспечивают создание тонких равномерных слоев с высокой твердостью и низким коэффициентом трения. Однако часто подбор оптимальных составов производится эмпирическим путем. Для эффективного создания новых составов функциональных поверхностных покрытий режущих инструментов необходим переход к теоретическому прогнозированию их выходных параметров. **Цель исследования.** Изучение трибологических характеристик концевых твердосплавных фрез производства АО «Лепсе» в условиях сухого трения скольжения всей периферией режущей части посредством проведения экспресс-тестов.

Материалы и методы. Исследования элементарных составов поверхностного покрытия и инструментального материала фрез проводили с использованием сканирующего электронного микроскопа JEOL JSM-6510LV. Определение силы трения осуществляли при помощи оригинальной лабораторной установки для экспресс-испытаний трибологических характеристик. Оценка степени износа поверхности концевых фрез после испытаний производилась с помощью прямого лабораторно-исследовательского микроскопа Axio Scope.A1.

Результаты исследования. Определен идентичный состав покрытия фрез. Установлена зависимость силы трения от времени работы инструмента. В начале работы (первые 30–300 секунд) сила трения достигла наивысших значений, после чего стабилизировалась на различных уровнях в зависимости от приложения нагрузки: 2,5 Н при 200 Н, 3,5 Н при 300 Н и 10 Н при 400 Н.

Обсуждение и заключение. Повышение осевой нагрузки приводит к усилению износа и образованию сколов. Размер и распространенность сколов вдоль режущей кромки увеличиваются, достигая критического уровня при нагрузке в 400 Н. Полученные данные возможно использовать при проектировании новых составов и архитектур поверхностных покрытий. Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением экспериментальной матрицы за счет испытаний покрытий различной архитектуры и элементного состава, а также с внедрением контроля температуры в зоне контакта.

© Плотников С. А., Клуонис А. С., 2026



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

Ключевые слова: концевые фрезы, твердосплавные фрезы, поверхностное покрытие, трибологические характеристики, экспресс-испытания, износ режущей кромки, сила трения, элементарный состав, режущие инструменты

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Плотников С.А., Клуонис А.С. Трибологические свойства фрез, работающих в условиях сплошного резания. *Инженерные технологии и системы.* 2026;36(2):433–447. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.26362.433-447>

Tribological Properties of End Milling Cutters Operating under Continuous Cutting Conditions

S. A. Plotnikov, A. S. Kluonis 

Vyatka State University,

Kirov, Russian Federation, <https://ror.org/01anxqg21>

 *alexanderkluonis@gmail.com*

Abstract

Introduction. Throughout the entire period of its development, agricultural machine engineering has paid special attention to the manufacture and improvement of cutting tools. Modern methods of coating create thin, uniform layers having high hardness and low friction coefficients. Optimal coating compositions are often selected empirically; therefore, developing new functional surface coating compositions for cutting tools requires theoretical prediction of their result parameters.

Aim of the Study. The aim of the study is to investigate tribological characteristics of carbide end milling cutters manufactured by JSC Lapse under the conditions of dry sliding friction across the entire cutting part periphery through conducting express tests.

Materials and Methods. The scanning electron microscope JEOL JSM-6510LV was used to study elemental compositions of the surface coating and tool material of the milling cutters. The friction force was determined using a unique laboratory setup for express tests of tribological characteristics. After testing, there has been assessed the degree of end milling surface wear using the direct laboratory research microscope Axio Scope.A1.

Results. There has been determined the identical composition of the milling cutter coating. There has been found the dependence of the friction force on the tool operating time. At the beginning of operation (the first 30–300 seconds), the friction force reached its highest values and then it stabilized at different levels depending on the application of load: 2.5 N at 200 N, 3.5 N at 300 N, and 10 N at 400 N.

Discussion and Conclusion. The increase in axial load causes increased wear and chipping formation. The size and propagation of chippings along the cutting edge increases and reaches a critical level at a load of 400 N. The obtained data can be used to create new surface coating compositions and architectures. The further research should be conducted to expand the experimental matrix through testing coatings of different architectures and elemental compositions, and implementing temperature control in the contact zone.

Keywords: end milling cutters, carbide alloy, surface treatment, tribological characteristics, express tests, cutting edge wear, friction force, elementary composition, cutting tools

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

For citation: Plotnikov S.A., Kluonis A.S. Tribological Properties of End Milling Cutters Operating under Continuous Cutting Conditions. *Engineering Technologies and Systems.* 2026;36(2):433–447. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.26362.433-447>

ВВЕДЕНИЕ

Применение современного высокопроизводительного и дорогостоящего оборудования для металлообработки, оснащенного системами числового программного и адаптивного управления, особенно в контексте гибких автоматизированных производств и мехатронных систем, обуславливает более строгие требования к качеству и надежности режущих инструментов, а также усложняет условия их эксплуатации. Наблюдается увеличение расхода инструмента на единицу продукции и рост затрат, которые могут достигать 4–7 % от общего бюджета на производство изделий¹. Следовательно, улучшение эксплуатационных характеристик режущих инструментов за счет увеличения их стойкости, надежности и производительности становится ключевым фактором, способствующим повышению общей эффективности производственного процесса [1].

На сегодняшний день машиностроение и металлообрабатывающая промышленность стремительно развиваются, внедряются новые технологии и материалы, что требует непрерывного совершенствования режущих инструментов. В условиях повышенной конкуренции и необходимости сокращения времени производства, оптимизация процессов обработки металлов становится неотъемлемой частью стратегий развития предприятий. В связи с этим создание и изучение новых типов покрытий для режущих инструментов, обладающих улучшенной поверхностной износостойкостью, а также высокими физико-механическими свойствами, имеет высокую значимость [2]. Направленное изменение характеристик покрытий путем изменения их состава, структуры и микроструктуры, а также изменение способов и режимов нанесения позволяет улучшить контактные свойства в процессе резания² [3; 4].

Проектирование новых составов и архитектур поверхностных покрытий невозможно без изучения контактных процессов, возникающих в условиях работы режущего инструмента. Таким образом, целью работы является исследование трибологических характеристик концевых твердосплавных фрез методом экспресс-тестирования при сухом трении скольжения всей периферией режущей части.

При этом необходимо изучить влияние осевой нагрузки на силу трения, возникающую при полном контакте поверхностей режущей части концевых твердосплавных фрез, и на характер степени износа рабочих поверхностей инструментов.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Современные технологии нанесения покрытий, такие как физико-химическое и химическое осаждение из паровой фазы, позволяют создавать покрытия с тонкими и однородными слоями, обладающими высокой твердостью и низким коэффициентом трения. Эти покрытия не только увеличивают износостойкость

¹ Савин Д.И., Титов О.О., Слепнева Н.Г. Отнесение затрат на режущий инструмент в статью основных затрат на изделие. В: Актуальные проблемы авиации и космонавтики: сб. материалов V Междунар. науч.-практ. конф., посвященной Дню космонавтики. Красноярск: СибГУ им. академика М. Ф. Решетнева; 2019. С. 272–274. <https://elibrary.ru/aexyul>

² Клуонис А.С., Плотников С.А. Обзор современных методов нанесения износостойких покрытий и их сравнительный анализ. В: Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства: сб. науч. трудов. Горки: Белорусская государственная сельскохозяйственная академия; 2023. С. 284–287. <https://elibrary.ru/tdzffe>

инструментов, но и способствуют уменьшению теплового воздействия на обрабатываемый материал, что в свою очередь улучшает качество обработки и снижает вероятность деформаций и дефектов изделий [5]. Кроме того, инновационные материалы для покрытий, такие как нитриды и карбиды металлов, позволяют достичь оптимального баланса между твердостью и вязкостью, что является критически важным для долговечности и эффективности режущих инструментов [6–8].

Все более популярными в современных технологических процессах обработки металлов становятся концевые твердосплавные фрезы с поверхностным покрытием, предназначенные для работы с полным перекрытием [9]. В рассматриваемом виде обработки имеют место крайне сложные факторы, включая высокие контактные напряжения и температуры, а также активное появление физико-химических процессов. В результате контактные поверхности фрезы подвергаются интенсивному износу от абразивного воздействия материала и адгезионно-усталостным, коррозионно-окислительным, диффузионным воздействиям [10]. Все описанные процессы зависят от параметров поверхностного покрытия и условий обработки, таких как скорость резания, подача и глубина реза. Ключевым фактором в повышении производительности и качества обработки является оптимизация этих параметров, что позволяет эффективно управлять теплонапряжением и механическим воздействием на фрезу [11].

В последнее время значительное внимание уделяется разработке многофункциональных покрытий, способных обеспечивать не только повышенную износостойкость, но и улучшенные антиадгезионные свойства. Это достигается за счет внедрения наноструктурированных слоев и композитных материалов, которые обладают уникальными механическими и термическими характеристиками [12]. Такие покрытия способны значительно продлить срок службы режущих инструментов, снизить потребление энергоресурсов и уменьшить затраты на обслуживание производственного оборудования [13].

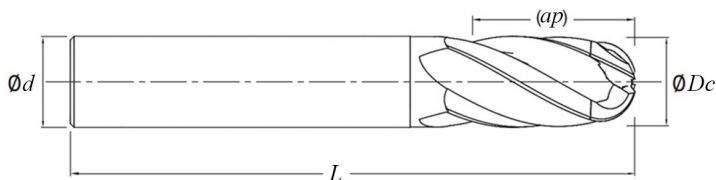
Так АО «Электромашиностроительный завод «Лепсе» (г. Киров) активно занимается разработкой и внедрением в производство ограниченного ассортимента металлорежущего инструмента, который представляет собой аналог импортного, ранее применяемого на предприятии. Для оценки свойств концевых твердосплавных фрез с покрытием применяются различные методы экспресс-тестирования [14], позволяющие быстро и эффективно оценить их эксплуатационные характеристики [15–17]. Экспресс-методы позволяют оперативно получить результаты выходных параметров концевых фрез (коэффициент трения, скорость истирания покрытия) а также выявить механизмы износа и деформации поверхностей [18–20].

Особое внимание уделяется исследованию влияния различных режимов обработки на трибологические характеристики инструментов, что включает анализ влияния температуры, давления и скорости резания на развитие износостойкости покрытий, а также изучение взаимодействия между микро- и наноуровнями структуры покрытия и обрабатываемого материала. Понимание этих взаимосвязей позволяет создавать более эффективные покрытия, адаптированные под специфические условия эксплуатации и требования к качеству обработки [21].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объекты исследования

В ходе работы были исследованы трибологические свойства поверхностных покрытий концевых твердосплавных фрез (рис. 1), изготовленных предприятием АО «Лепсе» и предназначенных для работы при сплошном резании. Рассматриваемые инструменты имели идентичные геометрические параметры – диаметр режущей части $D_c = 5h10$ мм с 4 зубьями, общей длиной $L = 45$ мм и длиной режущей части $ap = 14$ мм. Это исключало влияние геометрии на результаты испытаний и обеспечивало достоверность полученных данных.



Р и с. 1. Геометрические параметры концевой фрезы
F i g. 1. Geometric parameters of the end milling cutter

Примечание: d – диаметр хвостовика, 5 мм.
Note: d – shank diameter, 5 mm.

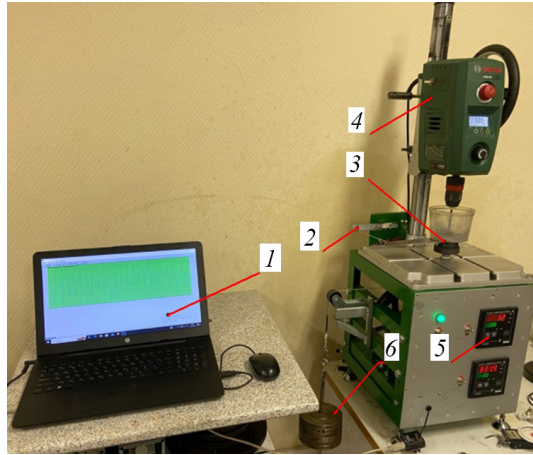
Источник: схема для рисунка 1 была взята из технической карты АО «Лепсе».
Source: figure 1 is a scan of the technical map of JSC Lepse.

Материалы и оборудование

Элементарные составы покрытий и основного материала фрез были исследованы на поперечных срезах с использованием сканирующего электронного микроскопа JEOL JSM-6510LV. Данный микроскоп позволил получить высокоточные изображения микроструктуры материалов, а также провести качественный и количественный анализ элементного состава методом рентгеновской энергетической дисперсионной спектроскопии.

Определение силы трения F_f происходило на оригинальной лабораторной установке для экспресс-испытаний трибологических характеристик (рис. 2), разработанной в Санкт-Петербургском политехническом университете имени Петра Великого. Данная установка позволила проводить испытания в условиях, максимально приближенных к реальным, относительно быстро и точно определять силы, возникающие при трении пар тел.

Процесс износа при сухом трении поверхностных покрытий концевых фрез проводился согласно схеме, приведенной на рисунке 3 (контртело показано в разрезе для более детального представления контактной области).



Р и с. 2. Испытательная установка для определения силы трения:

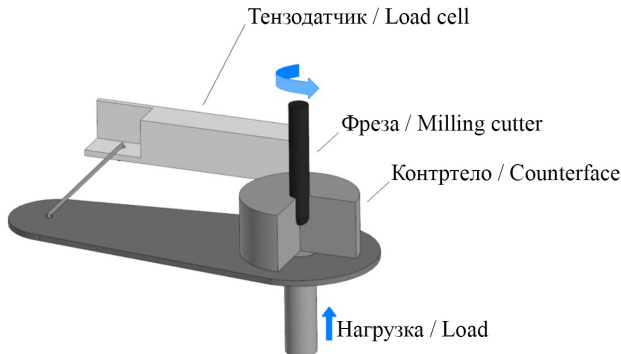
1 – ноутбук с ПО; 2 – балочный тензодатчик; 3 – приспособление; 4 – патрон настольного сверлильного станка Bosch PBD 40; 5 – измеритель-регулятор OWEN TRM202; 6 – грузы

F i g. 2. A test facility for determining the friction force:

1 – laptop with software; 2 – beam load cell; 3 – tool; 4 – bench-type drilling unit chuck Bosch PBD 40; 5 – measuring regulator OWEN TRM202; 6 – weights

Источник: фотографии для рисунков 2, 4 сделаны авторами статьи (г. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 14.02.2025).

Source: photos for figures 2, 4 were taken by the authors of the article (St. Petersburg, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 14.02.2025).



Р и с. 3. Схема трибологического нагружения

F i g. 3. Tribological loading scheme

Источник: рисунок 3 составлен авторами статьи в программе Компас-3D.

Source: figure 3 was made by the authors of the article using the Kompas-3D.

Для оценки степени износа поверхности концевых фрез после испытаний использовался прямой лабораторно-исследовательский микроскоп Axio Scope.A1 (рис. 4). Данный микроскоп оснащен системой цифровой обработки изображений, что позволило проводить анализ поверхности износа и определять признаки повреждений покрытия.



Р и с. 4. Общий вид микроскопа Axio Scope.A1
F i g. 4. General view of the micros Axio Scope.A1

Процедура исследования

Концевые фрезы закреплялись в патрон 4 (рис. 2) настольного сверлильного станка Bosch PBD 40, оснащенного функцией реверсивного вращения. Использование данного станка обеспечивало возможность регулирования скорости вращения и направления вращения инструмента. Далее в приспособление 3 на подшипнике, позволяющем ему совершать вращательное движение, устанавливалось контртело. Оно представляло собой цилиндрическое тело, изготовленное из стали марки 2Х18Н10Т, с предварительно полученным отверстием, точно повторяющим периферию рабочей части исследуемых фрез. Это обеспечивало равномерное распределение нагрузок и контактных напряжений по всей поверхности контакта. После создания контакта рабочего инструмента с поверхностью отверстия осуществлялся поджим контртела в осевом направлении через редуктор при помощи грузов 6. Вариация нагрузки возможна в диапазоне от 50 до 800 Н, что позволило исследовать трибологические свойства при различных условиях нагружения, характерных для реальных процессов резания. Приспособление 3 было соединено через тягу с балочным тензодатчиком 2 с измерением нагрузки до 200 Н. При работе установки сила трения преобразовалась в механическую деформацию сдвига тензодатчика и, в конечном итоге, в пропорциональный электрический сигнал. Этот сигнал считывался измерителем-регулятором 5, который обеспечил высокую точность регистрации данных и возможность их последующей обработки. Обработка полученных данных осуществлялась с использованием специально разработанной для ЭВМ программы 1. Программа выполняла преобразование полученных значений в график зависимости силы трения, F_f , от времени проведения испытания t , с. Это позволило наглядно представить процесс изменения силы трения в зависимости от параметров испытания и времени.

Было проведено три экспресс-испытания для инструментов при нагружении 200, 300 и 400 Н. Скорость реверсивного вращения образцов во всех испытаниях оставалась постоянной и составляла 500 мин^{-1} . Вращательное движение позволило смоделировать условия реального процесса износа поверхностного процесса при обработке.

Так как тензодатчик обладает начальным коэффициентом передачи силы (2,5 % от рабочего коэффициента передачи по паспорту), то перед началом

испытаний производилась тарировка стенда при помощи прецизионного динамометра. В таблице 1 приведены соответствия значений измерителя-регулятора от приложенной нагрузки к тензобалке.

Таблица 1

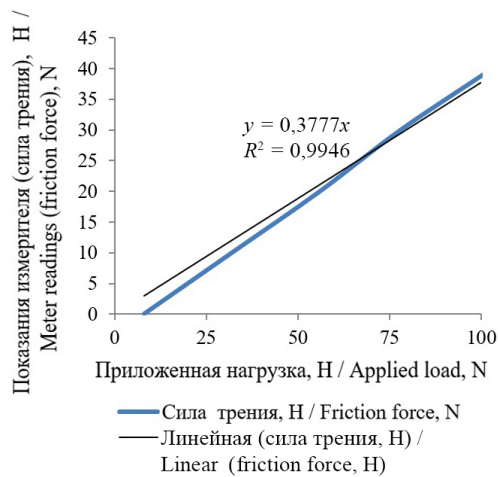
Table 1

Соответствие значений измерителя-регулятора от приложенной нагрузки к тензодатчику
The correspondence of the values of the measuring-regulator from the applied load to the load cell

Приложенная нагрузка, Н / Applied load, N	Показания измерителя-регулятора, Н / Measuring-regulator readings, N
0	8
10	32
20	56
30	78
40	103

Источник: таблица 1 составлена авторами статьи.
Source: the table 1 was compiled by the authors of the article.

На рисунке 5 приведены результаты тарировки стенда, позволившие установить зависимость между нагрузкой и сигналом тензодатчика с учетом его начальных характеристик. Тарировка обеспечила максимальную точность измерений силы трения и исключение систематических погрешностей.



Р и с. 5. Зависимость показания измерителя-регулятора от приложенной нагрузки к тензодатчику

F i g. 5. Dependence of the measuring-regulator reading on the load to applied the load cell

Источник: графики для рисунков 5, 6 составлены авторами статьи в программе Microsoft Excel.
Source: the graphs for figures 5 and 6 were compiled by the authors of the article using Microsoft Excel.

Весь экспериментальный цикл был проведен в условиях комнатной температуры и влажности. Перед каждым испытанием поверхности фрез и контртел были

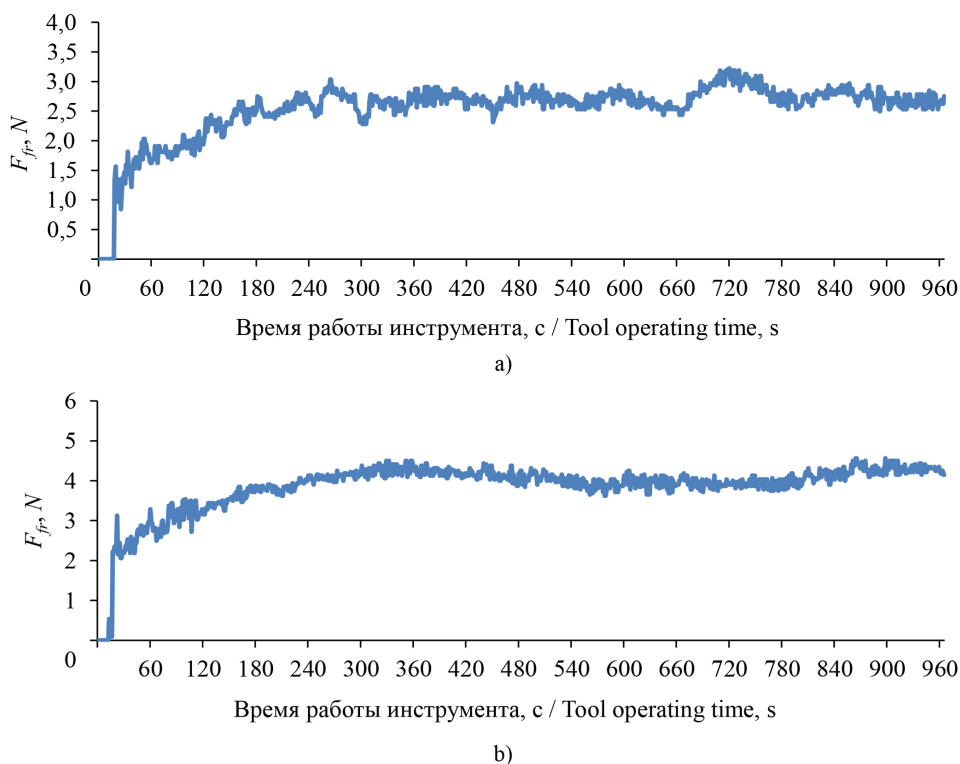
тщательно очищены и обезжирены с использованием этилового спирта, чтобы исключить влияние загрязнений на результаты.

Наиболее важное требование, предъявляемое к рассматриваемым в работе покрытиям – стойкость в условиях изнашивания. Испытания в условиях трения скольжения позволили выявить общие закономерности поведения образцов при внешнем нагружении и сформировать рекомендации по их применению в реальных условиях эксплуатации [22].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

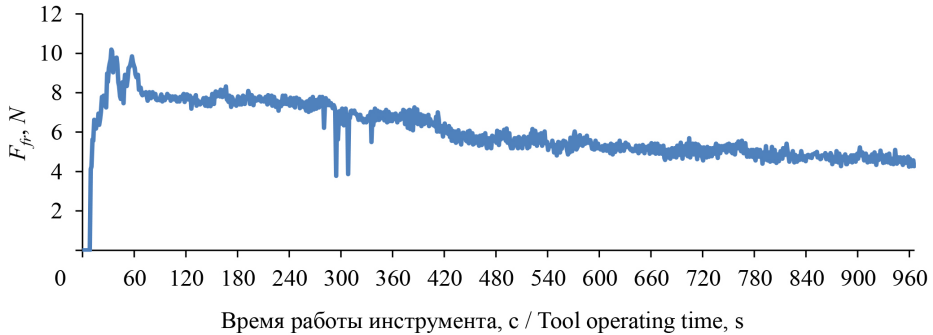
Состав поверхностных покрытий фрез был идентичен, поскольку получен при одинаковых режимах и в одной загрузке в вакуумной камере: N – 31,17 %; Al – 29,76 %; Ti – 37,29 %; Co – 0,4 %; W – 1,38 %. Толщина поверхностного покрытия составляет единицы микрон, так как из-под покрытия «просвечивает» инструментальный материал. Процентный состав инструментальных материалов фрез (Co – 9,05 %; W – 90,95 %) также был идентичен, что исключало вариации в материале основы.

На рисунке 6 изображены графики зависимостей силы трения от времени работы инструмента.



Р и с. 6. Сила трения при различных осевых нагрузках на концевую фрезу:
а) нагрузка 200 Н; б) нагрузка 300 Н

Fig. 6. Friction force at various axial loads on the end milling cutter:
a) load 200 N; b) load 300 N



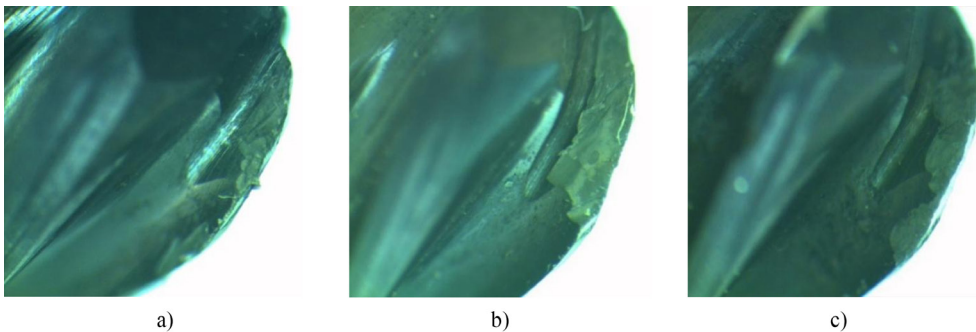
с)

Р и с. 6. Сила трения при различных осевых нагрузках на концевую фрезу: с) нагрузка 400 Н
 F i g. 6. Friction force at various axial loads on the end milling cutter: с) load 400 N

Начальная фаза процесса трения: все три кривые показывают резкий рост силы трения на начальном этапе, что связано с первоначальным контактом фрезы с материалом, формированием рабочей зоны трения и начальным износом. После начального пика силы трения стабилизируются на разных уровнях в зависимости от нагрузки:

- 200 Н: сила трения стабилизируется около $2,5 \pm 0,2$ Н;
- 300 Н: сила трения стабилизируется на уровне приблизительно $3,5 \pm 0,3$ Н;
- 400 Н: сила трения достигает еще более высоких значений в 10 ± 1 Н, что указывает на усиленное трение.

На рисунке 7 изображена поверхность фрез после испытаний при разной нагрузке.



Р и с. 7. Поверхность фрез после испытаний:
 а) нагрузка 200 Н; б) нагрузка 300 Н; с) нагрузка 400 Н
 F i g. 7. The surface of the end milling cutters after testing:
 а) load 200 N; б) load 300 N; с) load 400 N

Источник: фотографии для рисунка 7 сделаны авторами статьи при помощи микроскопа Axio Scope.A1.

Source: The photographs for figure 7 were taken by the authors of the article using the microscope Axio Scope.A1.

Нагрузка 200 Н (рис. 7 а): зуб фрезы демонстрирует минимальный износ, сколы присутствуют на грани режущей кромки и распространяются минимально.

Нагрузка 300 Н (рис. 7 б): сколы находятся на всей режущей кромке (сферической части фрезы) фрезы и распространяются дальше, чем в первом опыте. Увеличение нагрузки привело к более интенсивному протеканию процесса износа и повышенному тепловому воздействию, что снизило твердость материала зуба.

Нагрузка 400 Н (рис. 7 с): наблюдаются значительные признаки износа, глубокие трещины и крупные сколы на режущей кромке, при протекании процесса существуют риски поломки инструмента.

ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ графиков зависимости силы трения от времени работы концевых твердосплавных фрез диаметром 5 мм из материала WC-Co с покрытием TiAlN в условиях осевого нагружения позволил выявить тенденцию к снижению силы трения при увеличении времени работы инструмента (рис. 6). В начальные этапы (30–300 секунд) сила трения достигала максимальных значений из-за формирования контактной зоны и абразивного износа при первом соприкосновении фрезы с материалом. Затем сила трения снижалась, вероятно, благодаря эффекту самозаточки или установлению оптимальных условий трения, которые уменьшили сопротивление³.

При увеличении нагрузки сила трения возрастала вследствие повышения давления в контактной зоне, что привело к снижению смазывающей способности и увеличению трения между фрезой и материалом. При нагрузке 200 (рис. 6 а) и 300 Н (рис. 6 б) трение более стабильное, но с ростом нагрузки графики показали неравномерное поведение с очевидным увеличением силы трения. При нагрузке 400 Н (рис. 6 с) заметен резкий скачок силы трения и нехарактерное для других графиков ее снижение.

Критические моменты на графиках, где сила трения резко изменяется, могут указывать на износ инструмента или появление повреждений. Резкие скачки силы трения могут свидетельствовать о критической точке износа, когда поверхностное покрытие начинает терять свои свойства.

Анализ износа зубьев фрез (рис. 7) после испытаний позволил выявить характерные особенности износа инструмента в зависимости от величины приложенной осевой нагрузки. У всех образцов присутствуют сколы частиц металла от режущих кромок. Отколы с режущих кромок могут возникать по нескольким причинам.

Во-первых, высокая механическая нагрузка на режущую кромку вызывает концентрацию напряжений, которая может превышать предел прочности материала инструмента. Эти нагрузки часто усиливаются при прерывистом резании, высоких скоростях подачи или когда инструмент используется в условиях, превышающих его расчетные параметры [23].

Во-вторых, имеет значение тепловое воздействие. При резании выделяется значительное количество тепла, которое может привести к локальному перегреву и последующей деградации материала режущей кромки. При визуальном

³ Полюшкин Н.Г. Основы теории трения, износа и смазки: учеб. пособие. Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет; 2013. 192 с. <https://elibrary.ru/vmanwv>

исследовании образцов термального износа замечено не было, изменение цвета режущих кромок не обнаружено.

С повышением осевой нагрузки от 200 до 400 Н наблюдалось прогрессивное увеличение износа зубьев фрезы. Это указывает на то, что при более высоких нагрузках инструмент подвергается усиленному разрушительному воздействию, сокращая срок его службы. Нагрузка 400 Н является критической, при которой фреза может быстро выйти из строя.

Ограничением исследования является отсутствие фиксации температуры в зоне контакта режущего инструмента и контртела ввиду ограничения прямого доступа к месту измерения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной научный вклад работы заключается в получении впервые систематизированных данных о поведении силы трения и характере износа для данной комбинации инструментального материала и покрытия при указанных режимах осевого нагружения и сплошном периферийном контакте.

Покрытие TiAlN (нитрид титана и алюминия) может быть использовано для уменьшения износа инструмента благодаря своим отличным физико-химическим свойствам. Одним из ключевых преимуществ такого покрытия является его высокая термостойкость. Оно способно выдерживать температуры до 800–900 °С, что позволяет значительно снижать тепловое воздействие на основную массу инструмента. Однако размер и количество отколов на инструменте, покрытом TiAlN, могут служить индикатором некоторых проблем, таких как превышение нагрузок или дефект самого покрытия, например, его неравномерность или недостаточная толщина [24].

Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением экспериментальной базы за счет испытаний покрытий различной архитектуры, внедрением контроля температуры в зоне контакта и разработкой математических моделей. Такие модели позволят перейти от эмпирического подбора к теоретическому прогнозированию и научно обоснованному проектированию новых функциональных покрытий режущего инструмента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Romanov P. Improving the Efficiency of the Cutting Tool Based on its Modification. *E3S Web of Conferences*. 2023;402(6):10027. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340210027>
2. Мигранов М.Ш. Износостойкость режущего инструмента с наноструктурным покрытием. *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2012;(2–5):34–39. <https://www.elibrary.ru/pujnah>
3. Micallef C., Zhuk Y., Aria A.I. Recent Progress in Precision Machining and Surface Finishing of Tungsten Carbide Hard Composite Coatings. *Coatings*. 2020;10(8):731. <https://doi.org/10.3390/coatings10080731>
4. Saha B., Toh W.Q.Q., Liu E., Tor S.B., Hardt D., Lee J. A Review on the Importance of Surface Coating of Micro/Nano-Mold in Micro/Nano-Molding Processes. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2016;(26):013002. <https://doi.org/10.1088/0960-1317/26/1/013002>
5. Vereshchaka A.A. Functional Coatings for Cutters. *Bulletin of Bryansk State Technical University*. 2015;(4):25–37. <https://doi.org/10.12737/17077>

6. Bobzin K. High-Performance Coatings for Cutting Tools. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2017;(18):1–9. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2016.11.004>
7. Sousa V.F.C., Silva F.J.G. Recent Advances on Coated Milling Tool Technology – A Comprehensive Review. *Coatings*. 2020;10(3):235. <https://doi.org/10.3390/coatings10030235>
8. Zakeri A., Bahmani E., Ramazani A. A Review on the Enhancement of Mechanical and Tribological Properties of MCrAlY Coatings Reinforced by Dispersed Micro and Nanoparticles. *Energies*. 2022;15(5):1914. <https://doi.org/10.3390/en15051914>
9. Gouveia R.M., Silva F.J.G., Reis P., Baptista A.P.M. Machining Duplex Stainless Steel: Comparative Study Regarding End Mill Coated Tools. *Coatings*. 2016;6(4):51. <https://doi.org/10.3390/coatings6040051>
10. Башаров Р.Р., Кудояров Р.Г. Исследование процесса фрезерования концевой фрезой при высоких частотах вращения шпинделя станка. *Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета*. 2012;16(4):71–77. <https://www.elibrary.ru/pxgybf>
11. Monaca A.Ia., Murray J.W., Liao Z., Speidel A., Robles-Linares J.A., Axinte D.A. и др. Surface Integrity in Metal Machining – Part II: Functional Performance. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2021;(164):103718. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2021.103718>
12. Beake B.D., Fox-Rabinovich G.S., Veldhuis S.C., Goodes S.R. Coating Optimisation for High Speed Machining with Advanced Nanomechanical Test Methods. *Surface and Coatings Technology*. 2009;203(13):1919–1925. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.01.025>
13. Чемборисов Н.А., Высогорец Я.В. Исследование влияния нанесения износостойких нанопокрывтий на стойкость режущего инструмента. *Современная техника и технологии*. 2015;(8):48–62. URL: <https://technology.snauka.ru/2015/08/7385> (дата обращения: 25.08.2025).
14. Мокрицкий Б.Я., Пустовалов Д.А., Кваша В.Ю. Экспрессная сравнительная оценка работоспособности концевых твердосплавных фрез. *Металлообработка*. 2015;(2):49–53. <https://www.elibrary.ru/uavusp>
15. Chauhan S., Kumar R. Comparative Study on Cutting Performance of Plain and Coated Carbide Inserts in CNC Turning of EN9 Steel. *Engineering Research Express*. 2020;2(4):045009. <https://doi.org/10.1088/2631-8695/abbe81>
16. Wang T., Zha X., Chen F., Wang J., Lin L., Xie H. и др. Research on Cutting Performance of Coated Cutting Tools by a New Impact Test Method Considering Contact Stress Condition Caused by Segmented Chips. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021;68:1569–1584. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.07.001>
17. Wan M., Zhang W.-H., Dang J.-W., Yang Y. A Unified Stability Prediction Method for Milling Process with Multiple Delays. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2010;50(1):29–41. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.09.009>
18. Gradisek J., Kalveram M., Insperger T., Weinert K., Stepan G., Govekar E. и др. On the Stability Prediction for Milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2005;45(7–8):769–781. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.11.015>
19. Al-Asadi M.M., Al-Tameemi H.A. A Review of Tribological Properties and Deposition Methods for Selected Hard Protective Coatings. *Tribology International*. 2022;(176):107919. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107919>
20. Devarajan D.K., Rangasamy B., Mosas K.K.A. State-of-the-Art Developments in Advanced Hard Ceramic Coatings Using PVD Techniques for High-Temperature Tribological Applications. *Ceramics*. 2023;6(1):301–329. <https://doi.org/10.3390/ceramics6010019>
21. Mayrhofer P.H., Mitterer C., Hultman L., Clemens H. Microstructural Design of Hard Coatings. *Progress in Materials Science*. 2006;51(8):1032–1114. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2006.02.002>
22. Ilie F., Cotici C.D., Hristache A.-F. Study of the Grinding Process by Friction of Cereal Grains in Stone Mills. *Processes*. 2023;11(12):3376. <https://doi.org/10.3390/pr11123376>
23. Бутыгин В.Б., Демидов А.С. Рациональное использование твердосплавного инструмента при прерывистом точении стали. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2011;13(1–3):541–543. URL: http://www.ssc.smr.ru/izv_2011_1.html (дата обращения: 25.08.2025).

24. Lindvall R., Lenrick F., Andersson J.M., M'Saoubi R., Bushlya V. On Wear of TiAlN Coated Tools with and Without NbN Overlayer in Machining Titanium Alloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2024;(198):104148. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2024.104148>

REFERENCES

1. Romanov P. Improving the Efficiency of the Cutting Tool Based on its Modification. *E3S Web of Conferences*. 2023;402(6):10027. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340210027>
2. Migranov M.S. Wear Resistance of the Cutting Tool with a Nano-Structural Cover. *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*. 2012;(2–5):34–39. (In Russ., abstract in Eng.) <https://www.elibrary.ru/pujnah>
3. Micallef C., Zhuk Y., Aria A.I. Recent Progress in Precision Machining and Surface Finishing of Tungsten Carbide Hard Composite Coatings. *Coatings*. 2020;10(8):731. <https://doi.org/10.3390/coatings10080731>
4. Saha B., Toh W.Q.Q., Liu E., Tor S.B., Hardt D., Lee J. A Review on the Importance of Surface Coating of Micro/Nano-Mold in Micro/Nano-Molding Processes. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2016;(26):013002. <https://doi.org/10.1088/0960-1317/26/1/013002>
5. Vereshchaka A.A. Functional Coatings for Cutters. *Bulletin of Bryansk State Technical University*. 2015;(4):25–37. <https://doi.org/10.12737/17077>
6. Bobzin K. High-Performance Coatings for Cutting Tools. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2017;(18):1–9. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2016.11.004>
7. Sousa V.F.C., Silva F.J.G. Recent Advances on Coated Milling Tool Technology – A Comprehensive Review. *Coatings*. 2020;10(3):235. <https://doi.org/10.3390/coatings10030235>
8. Zakeri A., Bahmani E., Ramazani A. A Review on the Enhancement of Mechanical and Tribological Properties of MCrAlY Coatings Reinforced by Dispersed Micro and Nanoparticles. *Energies*. 2022;15(5):1914. <https://doi.org/10.3390/en15051914>
9. Gouveia R.M., Silva F.J.G., Reis P., Baptista A.P.M. Machining Duplex Stainless Steel: Comparative Study Regarding End Mill Coated Tools. *Coatings*. 2016;6(4):51. <https://doi.org/10.3390/coatings6040051>
10. Basharov R.R., Kudoyarov R.G. Research of End Milling Operation at the High Speed Rotation of Machine-Tool Spindle. *Vestnik UGATU*. 2012;16(4):71–77. (In Russ., abstract in Eng.) <https://www.elibrary.ru/pxgybf>
11. Monaca A.Ia., Murray J.W., Liao Z., Speidel A., Robles-Linares J.A., Axinte D.A., et al. Surface Integrity in Metal Machining – Part II: Functional Performance. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2021;(164):103718. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2021.103718>
12. Beake B.D., Fox-Rabinovich G.S., Veldhuis S.C., Goodes S.R. Coating Optimisation for High Speed Machining with Advanced Nanomechanical Test Methods. *Surface and Coatings Technology*. 2009;203(13):1919–1925. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.01.025>
13. Chemborisov N.A., Vysogorets Ya.V. Researching of Tool Life Increasing with Wearproof Nano-coatings. *Modern Technics and Technologies*. 2015;(8):48–62. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://technology.snauka.ru/2015/08/7385> (accessed 25.08.2025).
14. Mokritsky B.Ya., Pustovalov D.A., Kvasha V.Y. Comparative Express Health Evaluation End Mills Carbide. *Metalworking*. 2015;(2):49–53. (In Russ., abstract in Eng.) <https://www.elibrary.ru/uavusp>
15. Chauhan S., Kumar R. Comparative Study on Cutting Performance of Plain and Coated Carbide Inserts in CNC Turning of EN9 Steel. *Engineering Research Express*. 2020;2(4):045009. <https://doi.org/10.1088/2631-8695/abbe81>
16. Wang T., Zha X., Chen F., Wang J., Lin L., Xie H., et al. Research on Cutting Performance of Coated Cutting Tools by a New Impact Test Method Considering Contact Stress Condition Caused by Segmented Chips. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021;68:1569–1584. <https://doi.org/10.1016/j.jmpro.2021.07.001>
17. Wan M., Zhang W.-H., Dang J.-W., Yang Y. A Unified Stability Prediction Method for Milling Process with Multiple Delays. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2010;50(1):29–41. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.09.009>

18. Gradisek J., Kalveram M., Insuperger T., Weinert K., Stepan G., Govekar E., et al. On the Stability Prediction for Milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2005;45(7–8):769–781. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.11.015>
19. Al-Asadi M.M., Al-Tameemi H.A. A Review of Tribological Properties and Deposition Methods for Selected Hard Protective Coatings. *Tribology International*. 2022;(176):107919. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107919>
20. Devarajan D.K., Rangasamy B., Mosas K.K.A. State-of-the-Art Developments in Advanced Hard Ceramic Coatings Using PVD Techniques for High-Temperature Tribological Applications. *Ceramics*. 2023;6(1):301–329. <https://doi.org/10.3390/ceramics6010019>
21. Mayrhofer P.H., Mitterer C., Hultman L., Clemens H. Microstructural Design of Hard Coatings. *Progress in Materials Science*. 2006;51(8):1032–1114. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2006.02.002>
22. Ilie F., Cotici C.D., Hristache A.-F. Study of the Grinding Process by Friction of Cereal Grains in Stone Mills. *Processes*. 2023;11(12):3376. <https://doi.org/10.3390/pr11123376>
23. Butygin V.B., Demidov A.S. Rational Use of Hard-Alloy Tool at Discontinuous Steel Turning. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2015;(8):48–62. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://technology.snauka.ru/2015/08/7385> (accessed 25.08.2025).
24. Lindvall R., Lenrick F., Andersson J.M., M'Saoubi R., Bushlya V. On Wear of TiAlN Coated Tools with and Without NbN Overlayer in Machining Titanium Alloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2024;(198):104148. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2024.104148>

Об авторах:

Плотников Сергей Александрович, доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения Вятского государственного университета (610000, Российская Федерация, г. Киров, ул. Московская, д. 36), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8887-4591>, Researcher ID: R-8491-2016, plotnikovSA@bk.ru

Клуонис Александр Сергеевич, аспирант кафедры технологии машиностроения Вятского государственного университета (610000, Российская Федерация, г. Киров, ул. Московская, д. 36), ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0149-8082>, Researcher ID: JNQ-9802-2023, alexanderklunionis@gmail.com

Вклад авторов:

С. А. Плотников – общее руководство, постановка задач исследования.

А. С. Клуонис – теоретический анализ, проведение лабораторных исследований.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила в редакцию 26.03.2025; поступила после рецензирования 20.10.2025; принята к публикации 02.02.2026

About the authors:

Sergei A. Plotnikov, Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, Vyatka State University (36 Moskovskaya St., 610000 Kirov, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8887-4591>, Researcher ID: R-8491-2016, plotnikovSA@bk.ru

Alexander S. Klunionis, Post-graduate Student of the Department of Mechanical Engineering Technology, Vyatka State University (36 Moskovskaya St., 610000 Kirov, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0149-8082>, Researcher ID: JNQ-9802-2023, alexanderklunionis@gmail.com

Authors contribution:

A. S. Plotnikov – general guidance, formulating the study objectives.

S. A. Klunionis – theoretical analysis, conducting laboratory research.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 26.03.2025; revised 20.10.2025; accepted 02.02.2026

Информация для авторов и читателей

Научный журнал «Инженерные технологии и системы» публикует оригинальные научные исследования, способствующие развитию науки в области инженерных систем и технологий.

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

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

Журнал приветствует статьи, имеющие потенциально высокий импакт-фактор и/или содержащие материал о значительных достижениях в указанных направлениях. Особое внимание следует уделить качеству перевода. Желательно, чтобы он был выполнен носителем английского языка.

Не допускается направление в редакцию уже опубликованных статей или статей, отправленных на публикацию в другие журналы. **В случае обнаружения одновременной подачи рукописи в несколько изданий опубликованная статья будет ретрагирована (отозвана из печати).** Мониторинг несанкционированного цитирования осуществляется с помощью систем «Антиплагиат» и «iThenticate».

При подготовке статьи к публикации в журнале «Инженерные технологии и системы» необходимо учесть следующие пункты:

1. Указать **УДК**.

2. **Заголовок статьи** должен кратко и точно отражать содержание статьи, тематику и результаты проведенного исследования. *Приводится на русском и английском языках.*

3. **Аннотация** (200–250 слов) выполняет функцию расширенного названия статьи и повествует о ее содержании. В ней должны быть четко обозначены следующие составные части:

- 1) Введение (Introduction);
- 2) Цель статьи (Aim of the Article);
- 3) Материалы и методы (Materials and Methods);
- 4) Результаты исследования (Results);
- 5) 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.

Редакторы – *А. В. Савонина, С. Х. Зинина*
Перевод *Н. Н. Плеханковой*
Компьютерная верстка *Е. А. Климкиной*
Информационная поддержка *Р. В. Карасева*

Территория распространения – Российская Федерация, зарубежные страны.
Подписано в печать 17.06.2026 г. Дата выхода в свет 30.06.2026 г.
Формат 70 × 100 $\frac{1}{16}$. Усл. печ. л. 18,2.
Тираж 1 000 экз. 1 завод – 100 экз. Заказ № 418. Свободная цена.

Адрес типографии: 430005, Российская Федерация, Республика Мордовия, г. Саранск, ул. Советская, д. 24
(Издательство федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева»)



Editors *A. V. Savonina, S. H. Zinina*
Translation *N. N. Plekhankova*
Desktop publishing *E. A. Klimkina*
Informational support *R. V. Karasev*

Distributed in Russian Federation and foreign countries.
Signed to print 17.06.2026. Date of publishing 30.06.2026.
Sheet size 70 × 100 $\frac{1}{16}$. Conventional printed sheets 18.2.
Number of copies 1 000. 1st edition – 100 copies. Order no. 418. Free price.

Address of Printing Office: 24 Sovetskaya St., Saransk 430005, Republic of Mordovia, Russian Federation
(Publishing Office of National Reserch Mordovia State University)